



ANTONIO RODRIGUES XAVIER

**CONTROLE DE VELOCIDADE EM MALHA FECHADA
PARA ATUADOR DE UMA MINIBOMBA
PERISTÁLTICA APLICADA A BIOSSENSORES SPR**

**João Pessoa - PB
Março de 2019**



Antonio Rodrigues Xavier

CONTROLE DE VELOCIDADE EM MALHA FECHADA PARA ATUADOR DE UMA MINIBOMBA PERISTÁLTICA APLICADA A BIOSSENSORES SPR

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Telecomunicações

Cleumar da Silva Moreira, Dr.
Orientador
Arlindo Garcia de Sá Barreto Neto, Dr.
Coorientador

João Pessoa – PB, Março de 2019
©Antonio Rodrigues Xavier – xavierconect@gmail.com

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

X1c Xavier, Antonio Rodrigues

Controle de velocidade em malha fechada para atuador de uma minibomba peristáltica aplicada a biossensores SPR / Antonio Rodrigues Xavier. – 2019.
62 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal da Paraíba – IFPB / Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.

Orientador: Prof.^o Cleumar da Silva Moreira

Coorientador: Prof.^o Arlindo Garcia de Sá Barreto Neto

1. Bombas Peristálticas. 2. Controle de Rotação em Malha Fechada. 3. Controle PI e PID. I. Título.

CDU 621.68

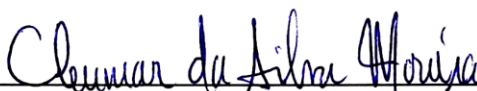
Ivanise Andrade M. de Almeida
Bibliotecária-Documentalista
CRB-15/0096

CONTROLE DE VELOCIDADE EM MALHA FECHADA PARA ATUADOR DE UMA MINIBOMBA PERISTÁLTICA APLICADA A BIOSSENSORES SPR

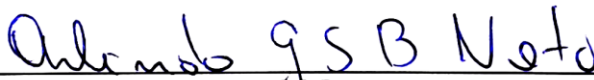
Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto Federal da Paraíba, como requisito necessário à obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 07/03/2019.

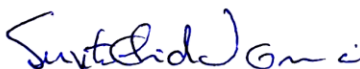
BANCA EXAMINADORA



Cleumar da Silva Moreira, Dr. – IFPB
Orientador



Arlindo Garcia de Sa Barreto Neto, Dr. – IFPB
Coorientador



Suzete Élide Nóbrega Correia, Dr. – IFPB
Membro da Banca



Rafael Franklin Alves Silva, Dr. – IFPB
Membro da Banca

João Pessoa – PB
Março de 2019

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda sua mansidão, por me conceder o privilégio da vida, a graça de acordar todos os dias com saúde, ouvir minhas orações, pela proteção em todos os momentos e pelas pessoas iluminadas que pôs no meu caminho.

Aos meus pais, José Mendes e Josefa Rodrigues, que apesar das dificuldades que enfrentam, sempre estão dispostos a me ajudar. E de forma especial, a minha mãe, que sempre lutou para que eu não desistisse de realizar meus sonhos.

À minha irmã, Sinome Rodrigues, por acreditar em mim. Ela que me alfabetizou, me ensinou matemática e a desenhar.

A minha namorada, Maria Laís, por acreditar em mim e na realização desse trabalho, me motivando quando já não tinha forças. Obrigado por tudo.

Ao orientador dessa dissertação, o Professor Doutor Cleumar da Silva Moreira, pela sua orientação, colaboração, disponibilidade e contribuições na realização desse trabalho. Obrigado por toda a paciência, confiança e pela oportunidade de trabalhar e contribuir com essa área multidisciplinar, que é a Engenharia Biomédica.

Ao coorientador desse trabalho, o Professor Doutor Arlindo Gárcia de Sá Barreto Neto, pelas orientações e contribuições na área de microbombas e bombas peristálticas, e igualmente, pelo seu apoio na elaboração desse trabalho.

Aos professores, Suzete Élide Nóbrega Correia e Rafael Franklin Alves Silva, demais membros da banca, por contribuir através da avaliação desse trabalho de forma a compartilhar conhecimento e agregar valor à pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica (PPgEE) do IFPB, por todo conhecimento transmitido que contribuíram para minha formação.

Ao Professor Iverton Caiandre Lima Brito, por ceder seu tempo e conhecimento no esclarecimento de dúvidas sobre procedimentos experimentais.

Aos amigos, Juliete da Silva, Ítalo Oliveira, Tais Félix, Weverton Lima, João Paulo, Gilliane Oliveira, Georgenes, Nayron Souza, entre outros que não menciono o nome, mas que estiveram ao meu lado durante esta fase, compartilhando momentos, pelo companheirismo, força e apoio.

Aos professores e amigos, Pedro Henrique e Ana Maria, por proporcionarem o contato com a pesquisa científica e por serem fonte de exemplo.

A todos, muito obrigado.

EPÍGRAFE

*“Quem sabe do valor que possui
não incorre na necessidade de
desmerecer os outros”*

Pe. Fábio de Melo

RESUMO

Neste trabalho, é apresentado o estudo e implementação de estratégias de controle em malha fechada para compensação da velocidade de rotação de uma minibomba peristáltica. O objetivo é minimizar distúrbios de cargas inerentes ao modo de atuação e que induzem variações no fluxo de saída. A minibomba foi fabricada em substrato plástico, por meio de impressão 3D, apresenta fácil manutenção, baixo consumo de energia e capacidade de reprodução em escala industrial. O modo de ação usado para deslocar fluido, baseia-se em movimentos peristálticos, através da compressão sucessiva de um tubo flexível. Um modelo matemático representativo da dinâmica de operação da minibomba foi obtido. Com base nesse modelo, duas estratégias de controle clássico foram propostas, sendo um controlador PI (Proporcional Integral) e PID (Proporcional Integral e Derivativo). Os parâmetros de sintonia dos controladores foram obtidos por meio de simulações. As estratégias de controle foram implementadas em um microcontrolador através de uma rotina de programa. Para realizar o controle em malha fechada, o microcontrolador fornece pulsos de excitação para o circuito de acionamento do motor na mesma frequência determinada pela ação de cada controlador. Um sensor de efeito *hall* mensura a velocidade de rotação do eixo do motor e atualizada a rotina de programa. Os resultados obtidos demonstram que as estratégias propostas apresentam condições de desempenho satisfatórias. Ambas foram testadas separadamente e são capazes de manter a velocidade de rotação da minibomba estabilizada em função de uma trajetória de referência pré-estabelecida, cujo intervalo de rotação varia de 150 rpm até 190 rpm. A faixa dinâmica da taxa de fluxo foi determinada entre 8,777 ml/min até 15,756 ml/min para um tubo flexível com diâmetro interno de 2,06 mm.

Palavras-chave: Bomba Peristáltica Miniaturizada; Impressão 3D; Controle de Rotação em Malha Fechada.

ABSTRACT

In this work, we present the study and implementation of closed loop control strategies to compensate the rotation speed of a peristaltic mini-bomba. The objective is to minimize load disturbances inherent to the actuation mode and that induce variations in the output fluid flow. The mini-pump has been manufactured in plastic substrate, through 3D printing, easy maintenance, low power consumption and industrial scale reproduction capacity. The mode of action used to displace fluid, is based on peristaltic movements, through the successive compression of a flexible tube. A mathematical model representative of the dynamics of mini-bomba operation was obtained. Based on this model, two classical control strategies were proposed, being a PI controller (Proportional Integral) and PID (Proportional Integral and Derivative). The tuning parameters of the controllers were obtained through simulations. The control strategies were implemented in a microcontroller through a program routine. To perform closed-loop control, the microcontroller provides excitation pulses to the motor drive circuit at the same frequency determined by each controller's action. A hall effect sensor measures the speed of rotation of the motor shaft and updates the program routine. The results show that the proposed strategies have satisfactory performance conditions. Both were tested separately and can maintain the speed of rotation of the mini-bomba stabilized in function of a pre-established reference trajectory, whose rotation range varies from 150 rpm up to 190 rpm. The dynamic range of the flow rate was determined from 8.777 ml / min to 15.756 ml / min for a flexible tube with internal diameter of 2.06 mm.

Keywords: Miniaturized peristaltic pump; 3D-printing; Closed loop speed control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama representativo de um dispositivo de análise que faz uso de um biossensor.	21
Figura 2 – Categorização de mecanismos de atuação das bombas miniaturizadas.	23
Figura 3 – Geometria típica de uma bomba peristáltica linear.	24
Figura 4 – Geometria típica de uma bomba peristáltica baseada em rolos.	25
Figura 5 - Taxa de fluxo média de uma bomba peristáltica miniaturizada de 4 rolos.	26
Figura 6 – Padrão de fluxo representativo de uma bomba miniaturizada.	27
Figura 7 – Geometria em 3D da estrutura (a) e protótipo da bomba peristáltica acionada por motor de passo (a).	29
Figura 8 – Taxa média de fluxo da bomba peristáltica para um tubo de látex com diâmetro interno de 3mm.	30
Figura 9 – Posicionamento do disco perfurado para medição da velocidade.	31
Figura 10 – Posicionamento do disco contendo apenas uma abertura para medição da velocidade.	31
Figura 11 – Motor de corrente contínua usado para atuação do sistema propulsor de fluxo.	32
Figura 12 – Rolamento de espera rígida em miniatura	33
Figura 13 – Tubo de PVC Tygon® R-3603.	33
Figura 14 – Vistas em 2D do protótipo da minibomba. Dimensões externas e internas da carcaça em vistas frontal e lateral a direita (a); Atuador para encaixe dos rolos com furo passante central, a esquerda e tampa fixadora, a direita (b); Tampa externa (c).	34
Figura 15 – Ilustração em 3D do protótipo da minibomba.	34
Figura 16 – Detalhes da montagem do protótipo da minibomba peristáltica.	35
Figura 17 - Circuito de acionamento da minibomba.	36
Figura 18 – Microcontrolador ATmega32U4 embutido na placa Arduino Pro Micro.	36
Figura 19 – Fluxograma da lógica de acionamento e medição da velocidade de rotação da minibomba.	37
Figura 20 – Sistema físico real operando em malha aberta (a esquerda) e etapas para desenvolvimento do controlador de velocidade em malha fechada (a direita).	39
Figura 21 – Entrada degrau referente a 100% do valor de tensão fornecida ao motor da bomba.	40
Figura 22 – Comparação entre sinal de velocidade de rotação ruidoso e sinal suavizado por filtro de média móvel com $M = 5$	41
Figura 23 – Localização de pólos reais no semi-plano esquerdo do plano complexo de Laplace.	42
Figura 24 – <i>Script</i> para estimação dos modelos de transferência da minibomba.	43
Figura 25 – Comparação dos modelos de 1ª e 2ª ordem em função da resposta dinâmica da minibomba em malha aberta.	44
Figura 26 – Localização dos pólos da função de transferência de 2ª Ordem.	44
Figura 27 – Diagrama de blocos dos controladores PI e PID.	45

Figura 28 – LGR PI(a), LGR PID(b), resposta degrau PI(c) e resposta degrau PID(d).	47
Figura 29 – Fluxograma da lógica de funcionamento dos controladores PI e PID.	49
Figura 30 – <i>Setup</i> experimental para os controladores PI e PID.....	50
Figura 31 – Desempenho das estratégias de controle PI e PID em função da variação da velocidade de referência.....	51
Figura 32 – Desempenho do controlador PID para uma trajetória de referência variada.	53
Figura 33 - Resposta dinâmica do controlador PID para $V_{ref} = 190$ rpm.....	54
Figura 34 – Representação gráfica da curva de calibração da taxa de fluxo em função da velocidade de rotação para um tubo cujo diâmetro interno é de 2,06 mm.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações do atuador empregado.	32
Tabela 2– Configuração das variáveis para aquisição.	38
Tabela 3 - Constantes de sintonia para os controladores PI e PID	48
Tabela 4 – Erros Médios Quadráticos para todas as trajetórias de referência testada.	52
Tabela 5 – Medidas experimentais para determinação da taxa média de fluxo para tubo de diâmetro interno de 2,06 mm.....	55

LISTA DE SIGLAS

A	Ampere
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
EMQ	Erro Médio Quadrático
FMM	Filtro de Média Móvel
g	Gramas
LGR	Lugar Geométrico das Raízes
LOC	<i>Lab-On-Chip</i>
ml	Mililitro
ml/min	Mililitro por Minuto
ms	Milissegundos
PI	Proporcional e Integral
PID	Proporcional Integral e Derivativo
PPR	Pulsos por Revolução
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
PWM	<i>Pulse-Width Modulation</i>
rpm	Rotações por Minuto
SPR	<i>Surface Plasmon Resonance</i>
V	Volts
W	Watts

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Cenário de Controladores em Malha Fechada Aplicados em Minibombas	16
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos.....	17
1.3 Organização do Trabalho.....	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 Biossensores e dispositivos de análise em fluxo	20
2.2 Bombas Miniaturizadas.....	22
2.3 Bombas Peristálticas.....	24
2.3.1 Bombas Peristálticas Lineares.....	24
2.3.2 Bombas Peristálticas Rotativas	25
2.4 Manufatura Aditiva	27
3. PROJETO E FABRICAÇÃO DA MINIBOMBA PERISTÁLTICA.....	29
3.1 Projeto Preliminar.....	29
3.2 Projeto Mecânico da Minibomba Proposta.....	32
3.3 Manufatura	35
3.4 Circuito de Acionamento	36
3.5 Medição da Velocidade de Rotação e Aquisição de Dados	37
4. PROPOSTA DE CONTROLE EM MALHA FECHADA	39
4.1 Identificação do Modelo do Matemático da Minibomba	40
4.2 Desenvolvimento das Estratégias de Controle PI e PID	45
4.3 Implementação dos Controladores PI e PID	48
5. RESULTADOS OBTIDOS	50
5.1 <i>Setup</i> experimental para caracterização da minibomba	50
5.2 Desempenho das Estratégias de Controle PI e PID	51
5.3 Determinação da Taxa Média de Fluxo	54
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros	58
Bibliografia.....	59

1. INTRODUÇÃO

Uma bomba de fluxo é um mecanismo capaz de transferir energia a um determinado fluido, através da elevação de pressão, velocidade ou ainda pela junção dessas formas de energia (BARRETO NETO, LIRA e MOREIRA, 2015).

A partir dos anos 90, a evolução das novas tecnologias de manufatura, associada ao surgimento de materiais com biocompatibilidade, despertaram o interesse de pesquisadores no desenvolvimento de bombas de fluxo miniaturizadas capazes de transferir pequenas quantidades de fluido, entre poucos micrometros até mililitros por minuto, através de microcanais. Todos esses fatores permitiram inúmeras aplicações, como a administração controlada de medicamentos, injeção de insulina, dosagem de drogas e reagentes, refrigeração de microcircuitos eletrônicos, entre outras (BARRETO NETO, LIRA e MOREIRA, 2015).

No campo das análises químicas e bioquímicas, as bombas de fluxo miniaturizadas tornaram-se fundamentais para transferência de substâncias em procedimentos de análise em fluxo, e mais recentemente, em sistemas analíticos miniaturizadas, também denominados de laboratórios em um chip (*Lab-On-Chip* – LOC). Esses sistemas reúnem etapas normalmente realizadas em um laboratório convencional, que vão desde a preparação, manipulação de amostras, detecção e análise em um único equipamento. Através desses sistemas, é possível a obtenção da melhoria do desempenho analítico, redução do volume de amostras e reagentes, otimização do tempo de análise, redução do índice de contaminação e custos (SOUSA, 2016).

Ademais, o estudo e desenvolvimento de bombas miniaturizadas contempla parte das pesquisas realizadas pelo Grupo de Sensores e Biossensores do Instituto Federal da Paraíba (IFPB) – Campus João Pessoa, que busca através de soluções econômicas e automatizadas projetar bombas de fluxo miniaturizadas que viabilizem a transferência de substâncias em aplicações de diagnóstico rápido, na qual são empregados sensores ópticos, baseados no fenômeno da Ressonância de Plásmons de Superfície (*Surface Plasmon Resonance* – SPR), como elemento de detecção. Esses sensores apresentam elevada sensibilidade, detecção rápida, ausência de marcadores, baixo custo e capacidade de inserção em um único equipamento.

Segundo Barreto Neto (2013) uma bomba de fluxo miniaturizada deve ser bem projetada e capaz de manter a taxa de fluxo constante ao longo do tempo ou que no máximo, apresente oscilações restritivas ao mecanismo de propulsão escolhido. Acrescenta ainda, que manter condições de desempenho favoráveis, especialmente em sensores e biossensores SPR, permite a obtenção de diagnósticos mais precisos, uma vez que esses detectores são sensíveis a fluxos pulsantes ou que contenham bolhas no canal fluídico que possam introduzir incorreções nas leituras.

Diante disso, o ponto inicial desse trabalho consistiu na construção de uma bomba de fluxo, capaz de oferecer as condições necessária à sua aplicação. Para tanto, uma bomba baseada em peristaltismo foi proposta. O peristaltismo é um processo biológico na qual um material é movido através do esôfago ou outra passagem anatômica pela contração do músculo liso em ondas rítmicas (BERG e DALLAS, 2013).

Trata-se de uma bomba peristáltica em miniatura, fabricada em substrato plástico, através de impressão 3D, sendo constituída por uma carcaça externa, um rotor central, tubo flexível e um motor de corrente contínua para o acionamento. O rotor central acoplado ao eixo do motor, é composto por quatro rolos, responsáveis pela geração dos movimentos peristálticos, através da compressão de um tubo flexível. A compressão e relaxamento do tubo cria uma pressão interna capaz de deslocar um fluido de uma extremidade para outra. Como vantagens desse tipo de bombeamento estão a facilidade de operação e manutenção, precisão nas dosagens, ausência de partes móveis em contato com o fluido, entre outras.

O modo de atuação usado para compressão do tubo flexível induz distúrbios de carga no motor, que resultam na variação da velocidade de rotação do eixo, o que acaba introduzindo variações no fluxo de fluido. O segundo ponto desse trabalho, propõem a utilização de estratégias de controle em malha fechada que, através de um modelo matemático adequado e representativo da dinâmica de operação da bomba, realize a minimização e/ou compensação da velocidade de rotação do atuador da minibomba.

Diante do exposto, o presente trabalho aborda o estudo e implementação de estratégias de controle baseadas em metodologias clássicas, como PI (Proporcional e Integral) e PID (Proporcional-Integral-Derivativo), empregados para a compensação da velocidade de rotação de uma minibomba peristáltica, tendo em

vista, a minimização de distúrbios de cargas inerentes ao modo de atuação e que induzem variações no fluxo de saída.

1.1 Cenário de Controladores em Malha Fechada Aplicados em Minibombas

Diversas abordagens de controle em malha fechada têm sido utilizadas para compensar distúrbios de cargas inseridos do mecanismo de atuação do dispositivo propulsor de fluxo, e que induzem variações na taxa de fluxo fornecida pelo mesmo.

Kim *et al* (2012) desenvolveram um controle em malha fechada para reduzir o atrito entre o tubo e rolos de uma bomba peristáltica aplicada no tratamento de nutrição enteral destinada a pacientes que possuem dificuldade de alimentar-se pela boca e/ou que recebem alimentação através de um tubo ou sonda flexível. O controle baseou-se na arquitetura multicamadas *fuzzy*, apresentando um desempenho satisfatório e taxa de dosagem precisas. O sistema foi validado de forma experimental e clínica.

Ingesson e Sandberg (2013) propuseram um controle em malha fechada para minimizar as pulsações induzidas pelos rolos de uma bomba peristáltica responsável pela transferência de fluxos sanguíneos no tratamento de hemodiálise. Os autores implementaram um controlador PI (Proporcional Integral) capaz de manter um desvio padrão de 0,1% entre a trajetória de referência e valor atual da variável controlada.

Lake, Heyde e Ruder (2017) desenvolveram um controle PID (Proporcional Integral e Derivativo) para bombas de pressão de seringa para realizar a regulação de fluxos de pressão em *chips* microfluídicos, obtendo-se uma estabilidade de $\pm 1\%$ do valor de referência.

Vinayakumar *et al* (2017) implementaram um controlador em uma bomba peristáltica acionada por um motor de corrente contínua, responsável pela liberação de drogas. A faixa de operação varia entre $0,6 \mu L$ para mais de $100 \mu L$. Esse tipo de bombeamento pode ser usado principalmente para entrega de insulina, ressaltam os autores.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar e implementar um sistema de controle em malha fechada, capaz de manter em regime permanente a velocidade de rotação de uma minibomba peristáltica baseada em rolos com a finalidade de reduzir distúrbios de carga impostos ao fluido, que são inerentes ao mecanismo de atuação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre os principais mecanismos de bombeamento de fluxo em dispositivos de análise baseados em biossensores; Princípio de funcionamento, forma de atuação, determinação da taxa de fluxo de bombas peristálticas baseadas rolos;
- Projetar e desenvolver um protótipo de bomba miniaturizada, seguido de medições de parâmetros para o modelamento do sistema de controle;
- Realizar aquisição e processamento da velocidade de rotação da minibomba medida por meio de um sensor de *feedback* (codificador de efeito hall); Obtenção e validação do modelo de transferência, baseado na identificação de sistema por métodos de 1ª e 2ª Ordem;
- Projetar o controlador de velocidade automático, empregando as metodologias de controle PI e PID e, posteriormente, embarcar o algoritmo de controle em um microcontrolador;
- Realizar a execução do controlador proposto de forma a obter resultados experimentais para validação e determinar através de procedimentos experimentais a taxa de fluxo de operação da minibomba peristáltica construída.

1.3 Organização do Trabalho

A apresentação dessa dissertação está dividida em 5 capítulos, os quais descrevem as etapas e os procedimentos aplicados para alcançar os objetivos propostos.

Capítulo 1 – Introdução: aborda os aspectos gerais que permeiam e conceituam os mecanismos de propulsão de fluxo com dimensões reduzidas, bem como suas principais aplicações. Em seguida, são apresentados os objetivos gerais e específicos (Seção 1.1), estudo da arte (Seção 1.2) e a organização do trabalho (Seção 1.3).

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: apresenta uma revisão bibliográfica acerca das teorias que formaram a base de estudo, explanando conceitos fundamentais sobre biossensores SPR e dispositivos de análise (Seção 2.1), Bombas miniaturizadas (Seção 2.2), bombas peristálticas (Seção 2.3), manufatura aditiva (Seção 2.4).

Capítulo 3 – Projeto e Fabricação da Minibomba Peristáltica Proposta: serão apresentados o projeto preliminar na (Seção 3.1), seguido do projeto proposto na (Seção 3.2), processo de manufatura (Seção 3.3), circuito de acionamento (Seção 3.4), medição da velocidade de rotação e aquisição de dados (Seção 3.5).

Capítulo 4 – Estratégias de Controle em Malha Fechada: neste capítulo serão apresentados as etapas de elaboração e implementação de um controle em malha fechada para compensação da velocidade de rotação do atuador na minibomba, dividido em: identificação do modelo matemático da minibomba (Seção 4.1), desenvolvimento de estratégias de controle (Seção 4.2) e implementação dos controladores PI e PID (Seção 4.3).

Capítulo 5 – Resultados Obtidos: neste capítulo, são mostrados os resultados experimentais, iniciando pela caracterização da minibomba (Seção 5.1), desempenhos das estratégias de controle PI e PID (Seção 5.2) e determinação da taxa média de fluxo (Seção 5.3).

Capítulo 6 – Considerações Finais: apresenta as considerações finais do trabalho e sugestões de continuidade em trabalhos futuros na (Seção 6.1).

Ao final desses capítulos, são descritas as fontes de referências utilizadas que reforçam o objetivo de estudo dessa pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os aspectos teóricos que formam a base de estudo. Para tanto, são abordados conceitos fundamentais e aplicações de biossensores SPR e dispositivos de análise em fluxo. Também será apresentada uma contextualização sobre bombas miniaturizadas, tendo como destaque as Bombas de Deslocamento Positivo, em especial, as peristálticas e das aplicações que empregam técnicas de fabricação em 3D.

2.1 Biossensores e dispositivos de análise em fluxo

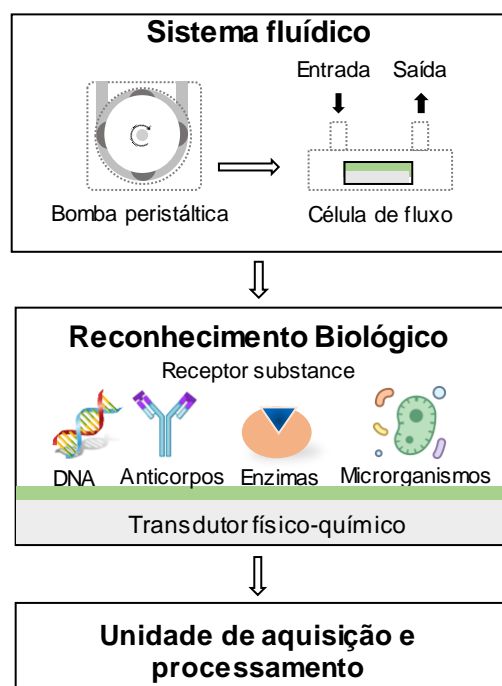
Nos últimos anos o desenvolvimento de biossensores têm atraído um grande interesse de pesquisadores, pois permitem a detecção rápida em procedimentos analíticos, apresentando elevada sensibilidade, ausência de marcadores, baixo custo, facilidade de uso e capacidade de inserção em um único dispositivo. Por essas inúmeras vantagens, têm sido utilizados como alternativa aos métodos convencionais, tais como, Ensaio de Imunoabsorção Enzimática (*Enzyme-Linked Immunosorbent Assay* – ELISA) e Reação em Cadeia da Polimerase (*Polymerase Chain Reaction* – PCR) (MOREIRA, 2010).

Por definição, os biossensores são dispositivos analíticos constituídos por um elemento de reconhecimento biológico e um transdutor físico-químico. Considerando o elemento de reconhecimento biológico e o transdutor utilizado, podem ser classificados como: amperométricos, potenciométricos, condutométricos, ópticos, acústicos e calorimétricos. Dentre os citados, os biossensores ópticos, em especial aqueles baseados na Ressonância de Plásmons de Superfície, vêm ganhando destaque em muitas aplicações, a citar: detecção de doenças e patógenos, monitoramento ambiental, toxinas transmitidas por alimentos, entre outras aplicações. Aspectos teóricos e práticos sobre o comportamento desses biossensores são encontrados de forma específica nas literaturas de (HOMOLA, 2008; MOREIRA, 2010 e OLIVEIRA *et al*, 2015).

Um dispositivo de análise que faz uso de um biossensor é mostrado na Figura 1. O mesmo é constituído por um sistema fluídico, camada de reconhecimento biológico, transdutor físico-químico e unidade de aquisição e processamento de dados. O sistema fluídico, é geralmente composto de uma bomba peristáltica e uma

célula de fluxo, local a qual o biossensor é fixado. Dessa forma, a bomba transfere a substância a ser identificada (analito) até o interior da célula de fluxo, a qual ocorre a interação do analito com o elemento de reconhecimento biológico imobilizado na superfície do biossensor (HOMOLA e PILIARIK, 2006). Essa interação produz uma mudança de parâmetros físico-químico (variação de calor, índice de refração, resistência, capacitância, entre outras) que pode ser identificada por um transdutor gerando um sinal elétrico proporcional em magnitude ou frequência a concentração do analito. Por fim, o sinal elétrico resultante é adquirido e processado de modo que o usuário tenha conhecimento se o analito foi ou não detectado (MOREIRA, 2010).

Figura 1 - Diagrama representativo de um dispositivo de análise que faz uso de um biossensor.



Fonte: Adaptada de Barreto Neto (2013).

Diante das vantagens mencionadas, é fato que, um dispositivo de análise em fluxo, cujo elemento de detecção é composto por um biossensor, deve possuir, em primeiro lugar, um sistema fluídico bem projetado e capaz de manter a taxa de fluxo constante ao longo do tempo ou que no máximo, apresente oscilações restritivas ao mecanismo de propulsão escolhido. Nesse sentido, manter condições de desempenho favoráveis, especialmente em biossensores SPR, permitem a obtenção de diagnósticos mais precisos, visto que esses biossensores são sensíveis a fluxos

pulsantes ou que contenham bolhas no canal fluídico que possam induzir leituras incorretas (BARRETO NETO, 2013).

2.2 Bombas Miniaturizadas

Desde a década de 90, diversas inovações na área de microfluídica, como a criação de técnicas de microfabricação e surgimento de novos materiais, possibilitaram o desenvolvimento de sistemas de propulsão de fluxo, em especial, bombas de miniaturizadas.

Assim, as bombas miniaturizadas tornaram-se indispensáveis na movimentação de substâncias em dispositivos de análise em fluxo, especialmente quando esses componentes são integrados em uma única estrutura, o que permite a melhoria do desempenho analítico, redução do volume da amostra, quantidade de reagentes ou substâncias químicas empregadas, diminuição do tempo de análise, redução do índice de contaminação, baixo consumo e custos (BARRETO NETO, 2013; SOUSA, 2016).

Para alcançar as características mencionadas anteriormente, as bombas miniaturizadas devem possuir estruturas internas e externas na ordem de milímetros a centímetros e fornecerem taxas de fluxos inferiores a 10 ml/min (NGUYEN e WERLEY, 2002). São classificadas de acordo com o método de atuação utilizado para propulsão de fluxo, e podem ser divididas em duas categorias, as Bombas de Deslocamento Mecânico (exercem pressão no fluido através de uma ou mais partes móveis) e Bombas Dinâmicas (proporcionam uma transferência direta de energia ao fluido) (IVERSON e GARIMELLA, 2008). A Figura 2 mostra uma visão geral a respeito da classificação das bombas com relação ao seu mecanismo de operação.

Figura 2 – Categorização de mecanismos de atuação das bombas miniaturizadas.



Fonte: adaptada de Iverson e Garimella (2008).

Algumas características inerentes as Bombas de Deslocamento Positivo, como por exemplo, o modo volumétrico para transferência de fluido e ausência de vazamentos internos ou externos, tornam esses tipos de bombas aplicáveis ao transporte de substâncias de maneira precisa, podendo ser denominadas de bombas de medição.

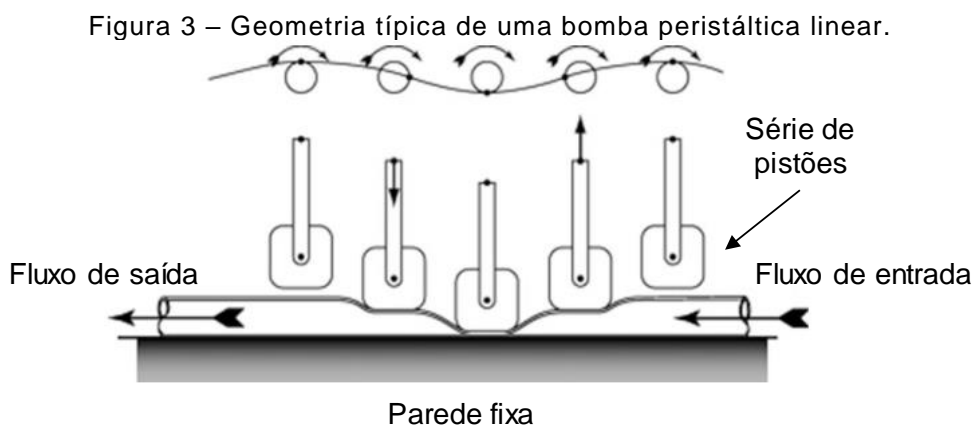
Um grupo especial de bombas, as peristálticas, pertencem as Bombas de Deslocamento Positivo, e são assim denominadas, pois imitam o processo biológico do peristaltismo, a qual um material é movido através do esôfago ou outra passagem anatômica pela contração do músculo liso em ondas rítmicas (BERG e DALLAS, 2013). Assim, serão abordadas definições, características e os tipos de bombas miniaturizadas, cuja forma de atuação é baseada no peristaltismo.

2.3 Bombas Peristálticas

Uma bomba peristáltica realiza a movimentação de fluido pela compressão progressiva de um tubo flexível, fazendo com que o volume desse fluido se desloque ao longo do tubo. A compressão do tubo é geralmente realizada por atuadores dispostos em série ou por um conjunto radial contendo dois ou mais rolos, acionado por um motor precisamente controlado. Dessa forma, de acordo com seu mecanismo de atuação, são classificadas como bombas peristálticas lineares e rotativas. Dentre suas características, pode-se citar: simplicidade funcional, podendo conter um ou mais canais que permitem transportar, aspirar fluidos com variada faixa de viscosidade e sem a presença de partes mecânicas em contato com o fluido. São capazes de operar de modo a fornecer um fluxo bidirecional e uma variada taxa de fluxo (MATOS *et al.*, 2001).

2.3.1 Bombas Peristálticas Lineares

As bombas peristálticas lineares são compostas por uma série de pistões (atuadores) responsáveis por realizar a compressão de um tubo flexível contra a parede fixa da bomba de forma sincronizada. Em decorrência do movimento sobre o tubo flexível, é gerada uma diferença de pressão que faz mover um volume de fluido de uma extremidade a outra do canal, conforme ilustrado na Figura 3. A taxa de fluxo nesse tipo de bomba é obtida em função do diâmetro do tubo e/ou pela frequência do ciclo de atuação (BERG e DALLAS, 2013).

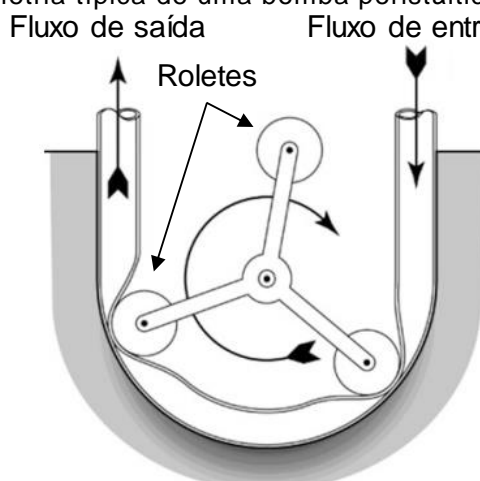


Fonte: adaptada de Berg e Dallas (2013).

2.3.2 Bombas Peristálticas Rotativas

Uma bomba peristáltica rotativa caracteriza-se como o equipamento mais utilizado para a movimentação de substâncias em dispositivos de análise em fluxo, uma vez que permite uma taxa de fluxo constante e robustez na operação. O transporte de substâncias não provoca o mínimo de dano ao fluido, já que o mesmo é conduzido no interior do tubo flexível sem a presença de contaminação (MATOS *et al*, 2001). São normalmente compostas por um rotor central, contendo dois ou mais rolos que realizam a compressão de um tubo flexível disposto sobre a parede da caixa da bomba, que em geral, possui a geometria em formato de 'U', conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Geometria típica de uma bomba peristáltica baseada em rolos.



Fonte: adaptada de Berg e Dallas (2013).

A determinação da vazão nesse tipo de bomba pode ser obtida de forma empírica ou através de sensores de fluxo miniaturizados. Pela forma empírica, alguns parâmetros devem ser conhecidos, como frequência ou velocidade de atuação do rotor e diâmetro interno do tubo. Assim, a vazão ou taxa de fluxo está relacionada com a massa ou volume de fluido que atravessa a seção transversal de um tubo por unidade de tempo. Matematicamente, a taxa de fluxo média pode ser determinada conforme na Equação 1.

$$Q_{med} = \frac{V}{t} \quad (1),$$

em que, V é o volume medido em mililitro (ml) ou em gramas (g) e t é o tempo em segundos decorrido da transferência. Por outro lado, se a velocidade de fluxo (\vec{v}) é conhecida, pode-se expressar a taxa de fluxo média em função da área da seção transversal (A) do tubo flexível, Equação 2.

$$Q = \vec{v} \times A \quad (2)$$

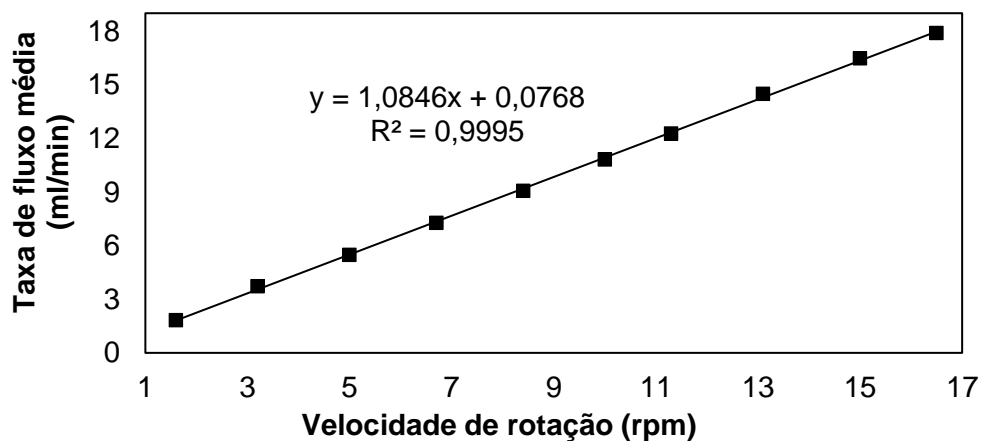
sendo A , determinada por:

$$A = \frac{\pi \times d^2}{4} \quad (3)$$

em que, (d) é o diâmetro interno do tubo.

A velocidade de rotação do rotor é uma medida relevante para determinar a faixa de operação da bomba, isto é, a taxa de fluxo mínima e máxima. Conforme a velocidade de rotação é alterada, modifica-se o volume de fluido de saída. Essa relação é demonstrada de forma gráfica na Figura 5, a qual utilizou-se uma bomba peristáltica rotativa miniaturizada, cujo rotor é composto de quatro rolos e o acionamento realizado por motor de passo (DIAS JÚNIOR, 2016).

Figura 5 - Taxa de fluxo média de uma bomba peristáltica miniaturizada de 4 rolos.

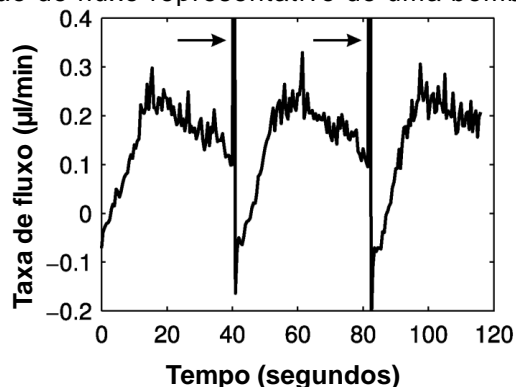


Fonte: elaborada pelo autor.

Como mostrado na Figura 5, existe uma relação linear entre a taxa de fluxo e a velocidade de rotação. No entanto, o princípio de atuação imposto pelos rolos induz distúrbios de carga na taxa de fluxo. No trabalho de Skafte-Pedersen *et al.*, 2009 é

proposto o desenvolvimento de uma bomba miniaturizada para aplicações microfluídicas, sendo composta por 12 canais integrados. Um nanosensor de fluxo comercial foi usado para mensurar o padrão de fluxo representativo de um canal, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Padrão de fluxo representativo de uma bomba miniaturizada.



Fonte: adaptada de Skafte-Pedersen *et al* (2009).

Segundo o autor, distúrbios de carga são verificados na taxa de fluxo no ponto de liberação dos roletes, tal como indicados pelas setas na Figura 6.

2.4 Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing* – AM) ou impressão 3D como é comumente conhecida, surgiu no final da década de 80, pelo cientista Charles W. Hull com a construção de um aparelho capaz de produzir objetos tridimensionais pelo método estereolitografia (HULL, 1986). Desde então, houve um progresso na utilização das impressoras 3D como ferramenta de fabricação multifuncional, tais como, no campo biomédico, incluindo de diagnósticos (PLEVNIAK, 2016), radiologia (FRIEDMAN, 2016), implantes (PARTHASARATH, 2018) próteses (COGNOLATO, 2018), tecidos ósseos (JARIWALA, 2015) e entre outros campos.

A impressão 3D converte o projeto assistido por computador (CAD), em “objetos” construídos pela deposição do material, camada por camada, operando com uma ferramenta de forma controlada (TOFAIL, 2018). Esse tipo de fabricação tem sido promissora comparada à técnica subtrativa, método tradicional de usinagem, pois permite mínimos custos de fabricação, design complexo, versatilidade na criação, ausência de resíduos, redução no tempo de fabricação, fácil alteração e menor

manipulação operacional (ADDITIVE MANUFACTURING: STRATEGIC RESEARCH AGENDA, 2014). Essas características tornam esse método atrativo no campo de prototipagem, testes e produções de dispositivos para diversos campos (SHARAFELDIN, 2018).

Plataformas de ensaios miniaturizadas de baixo custo que operam com volumes ínfimos de amostra, alta sensibilidade e detecção rápida, são dispositivos emergentes no mercado. O uso em destaque da impressão 3D em diagnósticos é a produção e fabricação de dispositivos fluídicos miniaturizados, com geometria complexa, responsável por transportar pequeno volume de amostra, com menores custos comparados às técnicas tradicionais (SHARAFELDIN, 2018).

Em Oh (2018) uma tecnologia de baixo custo impressa em 3D que permite realizar leituras manuais da viscosidade do sangue através de câmaras fluídicas graduadas, o autor acredita que futuramente essas plataformas facilitaram aplicações clínicas e industriais.

O autor Kadimisetty (2018) desenvolveu uma matriz microfluídica que emprega a detecção rápida de imunoensaio eletroquimioluminescência (*Electrogenerated Chemiluminescence* – ECL) automatizada, usando 1 a 2 microlitros de amostra, custando menos que 1 dólar o dispositivo.

No trabalho apresentado por Alam *et al* (2017), uma bomba peristáltica miniaturizada foi fabricada capaz de bombear fluidos que variam de 40 *mL/min* a 200 *mL/min*, sendo facilmente integrada em qualquer sistema LOC.

Nesta perspectiva nota-se um potencial interesse em impressões 3D no campo microfluídico pela possibilidade de criação de novos dispositivos, facilidade de fabricação e baixo custo. Todavia, essa aplicabilidade é limitada para impressões de canais de fluidos que necessitam de dimensões inferiores a escalas micrométricas (WAHEED *et al.*, 2016).

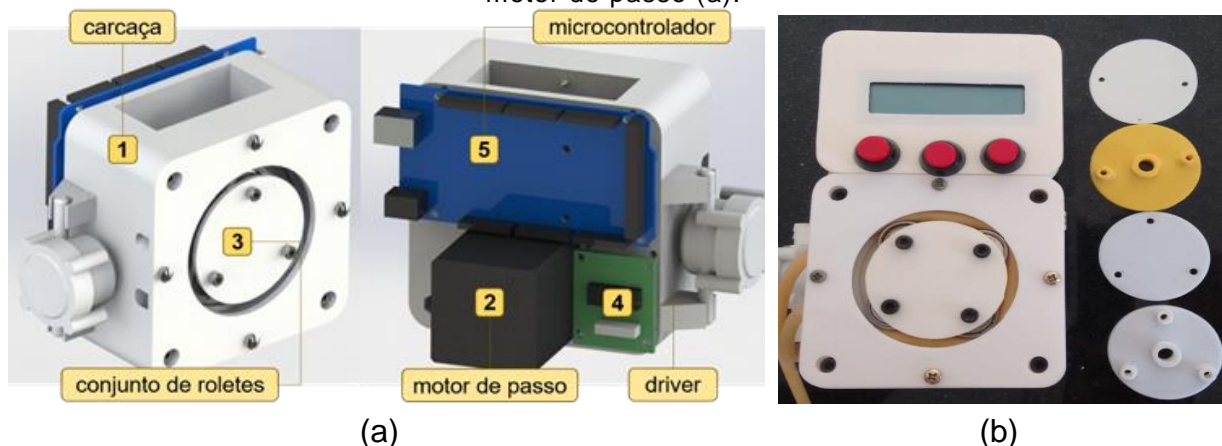
3. PROJETO E FABRICAÇÃO DA MINIBOMBA PERISTÁLTICA

3.1 Projeto Preliminar

A proposta inicial dessa dissertação, consistiu no estudo e desenvolvimento de um controlador em malha fechada aplicado para compensação de uma bomba peristáltica portátil acionada por motor de passo. O projeto e fabricação dessa bomba encontra-se disponível na dissertação de mestrado de Dias Júnior, 2016, incluindo ainda, detalhes de acionamento e testes experimentais para validação. Para complementar a sua pesquisa, foi proposto uma otimização da parte física da bomba, a fim de determinar, alguns parâmetros essenciais ao seu funcionamento, como, medição de vazão e velocidade rotação.

Na Figura 7(a), é mostrada a geometria em 3D da bomba peristáltica acionada por motor de passo. As peças que compõem a estrutura foram projetadas em tamanho reduzido usando impressão 3D e dispositivos eletrônicos de baixo custo. Consiste basicamente em um motor de passo (12 V), *drive* para acionamento, caixa de redução mecânica, tubo flexível de látex (com diâmetro interno de 3 mm) e um conjunto de rolos, podendo operar com 2, 3 ou 4 rolos, conforme mostrado na Figura 7(b).

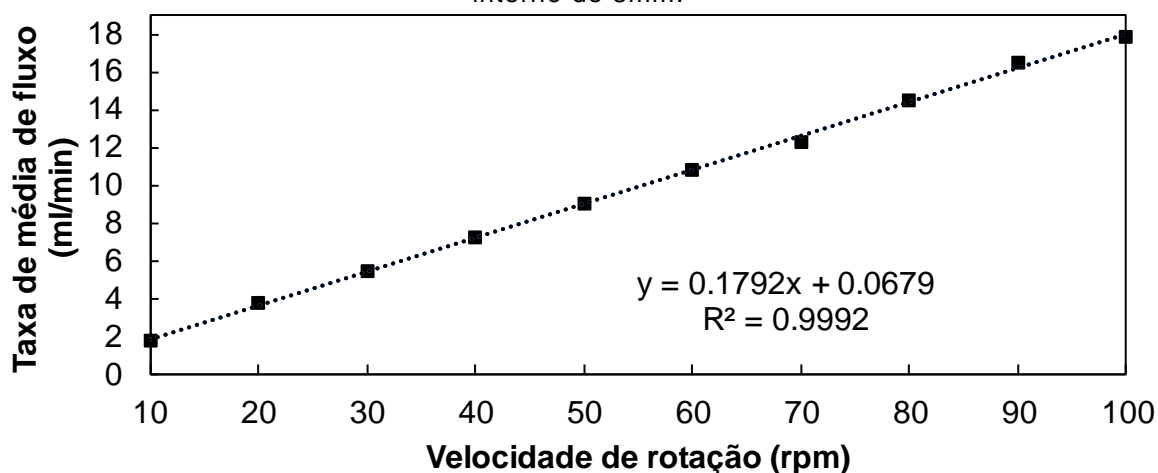
Figura 7 – Geometria em 3D da estrutura (a) e protótipo da bomba peristáltica acionada por motor de passo (a).



Fonte: adaptada de Dias Júnior (2016).

Usando uma configuração de 4 rolos, a taxa de fluxo média da bomba foi determinada com base na variação da velocidade de rotação do atuador (conjunto de rolos), medida em rpm, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Taxa média de fluxo da bomba peristáltica para um tubo de látex com diâmetro interno de 3mm.



Fonte: elaborado pelo autor.

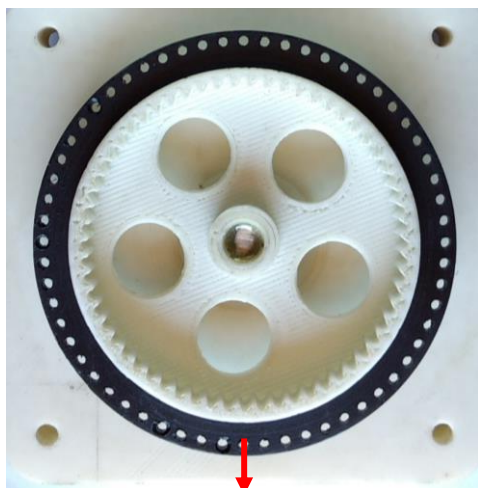
O gráfico mostrado na Figura 8, demonstrou uma linearidade entre a velocidade de rotação e a taxa de fluxo de saída. A variação da velocidade do motor foi realizada via *software* com a bomba operando em malha aberta. No entanto, verificou-se um desvio mínimo na taxa de fluxo conforme foi realizada a mudança de passo do motor, demonstrando ainda, que o motor de passo, mesmo operando em malha aberta, possui um eficiente controle mecânico de rotação e torque.

Por outro lado, para fechar a malha de controle da bomba seria necessário utilizar um sensor de *feedback*, isto é, um sensor de posição usado para medição da velocidade de rotação em tempo real, além de atualizar a variável controlada. As medidas de velocidade foram realizadas considerando a velocidade da carga movida pelo motor de passo, sendo a caixa de redução e conjunto de rolos. Para tanto, um disco perfurado foi projetado de modo que pudesse ser acoplado ao diâmetro externo da engrenagem movida, conforme mostrado na Figura 9. Um *encoder* óptico de quadratura foi usado para medir a velocidade de rotação, porém os valores mensurados não indicavam com precisão a velocidade real, além da dificuldade de acoplar o dispositivo nas extremidades da bomba.

Na tentativa de corrigir esse problema, um outro disco foi projetado em impressão 3D (Figura 10), sendo composto por uma única abertura com 2 mm de largura. Dessa forma, o *encoder óptico* realiza a leitura de apenas um pulso por volta, e em função do tempo decorrido de uma rotação completa, a velocidade de poderia ser determinada. A solução proposta não apresentou falhas nas leituras, entretanto, esse método acarretaria em atrasos na execução do controlador em malha fechada

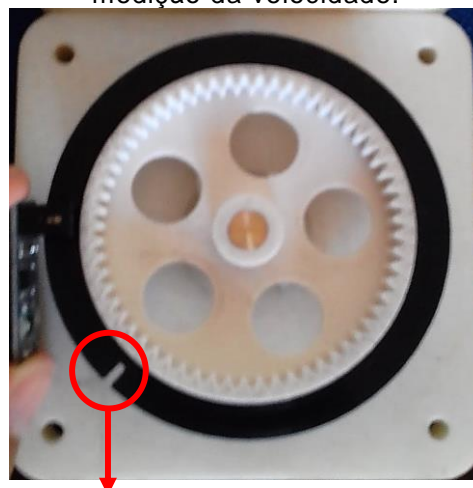
a ser desenvolvido, visto que a atualização da variável medida depende do tempo para realizar uma volta completa. Além disso, seria necessário um *encoder* que oferecesse uma maior resolução, baixa sensibilidade a ruídos e repetibilidade.

Figura 9 – Posicionamento do disco perfurado para medição da velocidade.



Disco perfurado

Figura 10 – Posicionamento do disco contendo apenas uma abertura para medição da velocidade.



Disco com uma abertura

Fonte: elaborado pelo autor.

As dificuldades encontradas nesse projeto, como na medição da velocidade de rotação, falta de espaço para fixação de sensores e geometria complexa das peças, inviabilizaram o desenvolvimento de uma estratégia de controle em malha fechada para o controle da velocidade do atuador da bomba peristáltica. Diante disso, como alternativa a bomba peristáltica, foi proposto o desenvolvimento de um sistema de propulsão de fluxo capaz de desempenhar as condições necessárias para se alcançar o objetivo dessa dissertação. Essas condições incluem, simplicidade operacional, miniaturização da geometria, utilização de componentes eletrônicos de baixo custo e que permita a inserção de sensores para medição de parâmetros pertinentes ao seu funcionamento. As etapas do projeto e fabricação da minibomba proposta são descritas na Seção 3.2.

3.2 Projeto Mecânico da Minibomba Proposta

A primeira etapa do projeto mecânico, consistiu na escolha do atuador para a minibomba peristáltica rotativa. Essa escolha foi realizada em função de parâmetros adequados, dentre os quais, torque mecânico, faixa de velocidade e tensão de alimentação foram avaliados. Sendo assim, um motor de corrente contínua (modelo GM25-370), mostrado na Figura 11, foi caracterizado. O mesmo possui tensão de alimentação de 6 V, uma caixa de redução mecânica de 1:34 e um codificador de pulsos (*encoder*) integrado para medição da velocidade do eixo, o que elimina a necessidade de um tacômetro digital externo para essa função. Na Tabela 1, são descritas as especificações do referido motor.

Figura 11 – Motor de corrente contínua usado para atuação do sistema propulsor de fluxo.



Fonte: www.filipeflop.com.

Tabela 1 – Especificações do atuador empregado.

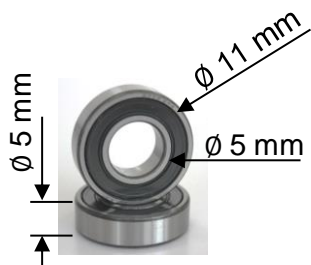
Componentes	Material / Descrição
Motor	Modelo GM25-370 ~ 6 V
Velocidade sem carga	210 rpm / 0.13 A
Máxima eficiência	2.0 kg.cm / 170 rpm / 2.0 W / 0.60 A
Potência máxima	5.2 kg.cm / 110 rpm / 3.1 W / 1.10 A
Torque de parada	10 kg.cm / 3.2 A
Mecanismos de redução	1:34
Resolução endorcer <i>hall</i>	11 PPR

Fonte: elaborada pelo autor.

O protótipo da minibomba a ser desenvolvido funcionará da seguinte forma: uma peça circular (rotor) fixada ao eixo do motor, contém rolos dispostos em sua circunferência responsáveis pela compressão de um tubo flexível. A ação gerada pela compressão, seguida de relaxamento do tubo, produz uma onda de pressão interna capaz de deslocar um determinado volume de fluido. Dessa forma, a escolha

do tipo de rolo e do tubo flexível empregados, influenciarão diretamente na criação do *layout* da minibomba. Para desempenhar a função dos rolos, serão utilizados rolamentos comerciais miniaturizados, modelo de esfera rígida fabricado pela HCH BEARINGS. Na Figura 12, são mostrados o modelo e as dimensões do rolamento. Um tubo de Policloreto de Vinil (*Polyvinyl chloride* – PVC) (Tygon® R-3603, medindo 2,06 x 3,78 mm de diâmetro interno e externo, respectivamente) é ilustrado na Figura 13 e será usado para a transferência de fluidos. Esse tubo possui utilidade laboratorial e foi disponibilizado pelo Laboratório de Biossensores da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Figura 12 – Rolamento de esfera rígida em miniatura



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 13 – Tubo de PVC Tygon® R-3603.

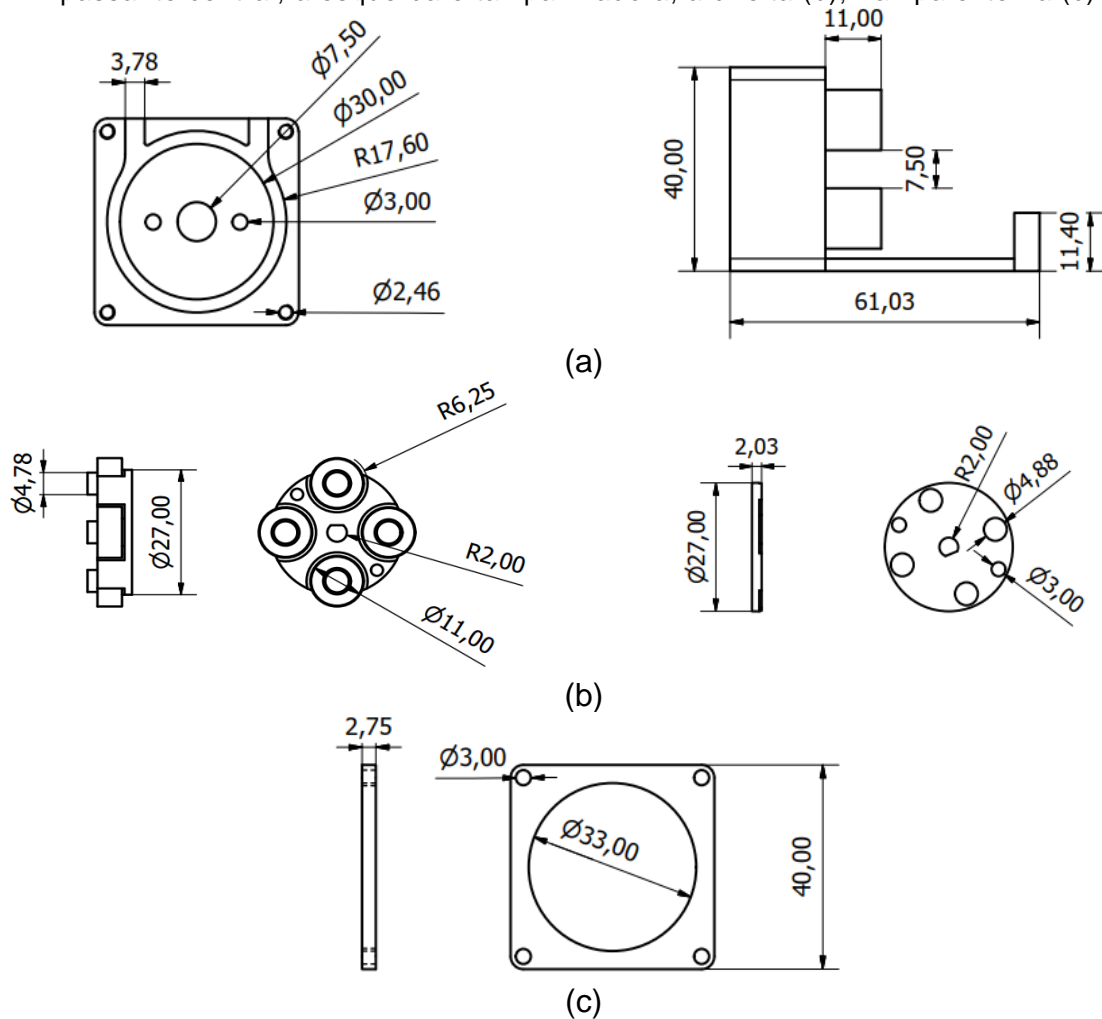


Fonte: Adaptada de www.componentsupplycompany.com.

A peça circular será composta por 4 rolamentos para geração de movimentos peristálticos. Essa quantidade é justificada, pela intenção de se projetar um sistema propulsor de fluxo miniaturizado, portabilidade, disponibilidade comercial e por apresentar uma espessura apropriada para realizar a compressão do tubo de PVC. Segundo Klespitz e Kovács (2014), aumentando-se o número de rolos, é possível gerar mais ondas de pressão ao longo do tempo, o que permite a redução do desvio de pressão, inserido na forma de pulsações, ao fluxo de saída.

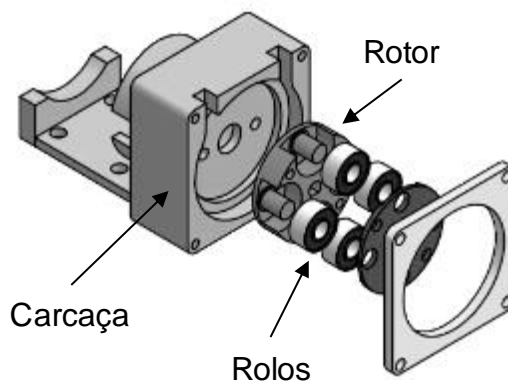
Finalmente, um *layout* da minibomba foi criado através de um *software* de CAD, sendo projetado em três partes, a citar: carcaça, rotor central e tampa externa, conforme ilustradas nas Figuras 14(a), (b) e (c), respectivamente. Uma vista em 3D formada pela junção dessas partes é mostrada na Figura 15.

Figura 14 – Vistas em 2D do protótipo da minibomba. Dimensões externas e internas da carcaça em vistas frontal e lateral a direita (a); Atuador para encaixe dos rolos com furo passante central, a esquerda e tampa fixadora, a direita (b); Tampa externa (c).



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 15 – Ilustração em 3D do protótipo da minibomba.

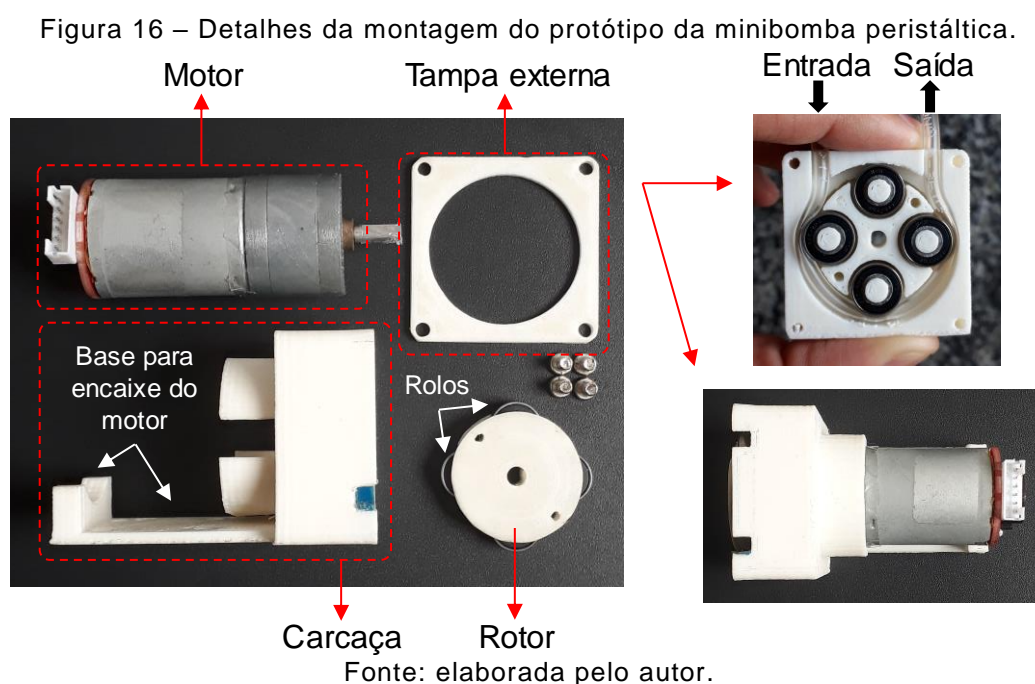


Fonte: elaborada pelo autor.

A carcaça ilustrada na Figura 14(a), possui um orifício cilíndrico para encaixe do rotor e inserção do tubo PVC. O layout possui dimensões totais de 40 mm de largura, 40 mm de altura e 15 mm de espessura, respectivamente.

3.3 Manufatura

Após a definição do método de atuação e criação da geometria da minibomba, a etapa seguinte consistiu no processo de construção do protótipo. As peças mostradas nas Figuras 14(a), (b) e (c) foram fabricadas em impressão 3D, usando o plástico ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) como substrato. A impressão levou cerca 60 minutos para ser finalizada. Em seguida, as peças foram polidas, tendo em vista, à remoção de resíduos deixados pelo bocal da impressora. Na Figura 16, são mostradas as peças e detalhes da montagem do protótipo.

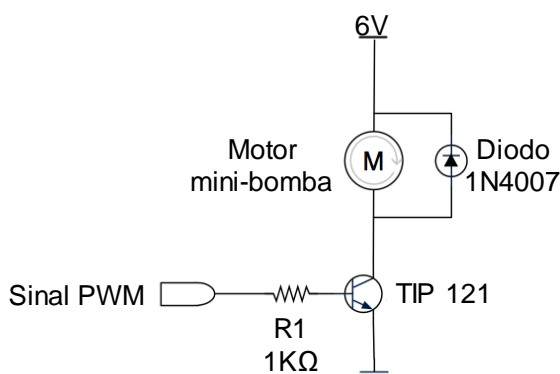


Conforme verificado na Figura 16, o protótipo demonstrou simples montagem, indicando também, fácil manutenção. Além disso, a técnica de manufatura empregada, permite a confecção de peças para reposição, bem como a possibilidade reprodução em escala industrial.

3.4 Circuito de Acionamento

A capacidade de transporte fluídico da minibomba em estudo, foi obtida em função da variação de tensão aplicada ao motor, fazendo-o operar em diferentes velocidades de rotação. O circuito de acionamento, esquematizado na Figura 17, utiliza um transistor bipolar para controle da tensão entregue ao motor. Uma fonte de 12 V (corrente de 1,5 A) conectado a um regulador variável fornece a tensão de alimentação de 6V.

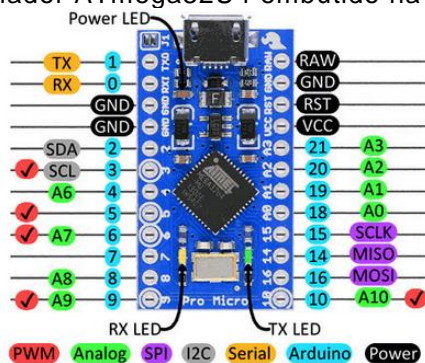
Figura 17 - Circuito de acionamento da minibomba.



Fonte: elaborada pelo autor.

A variação de tensão no transistor é realizada através de um sinal de Modulação de Largura de Pulso (*Pulse-Width Modulation* – PWM) fornecido por um microcontrolador ATmega32U4 (ATMEL, 2018), ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Microcontrolador ATmega32U4 embutido na placa Arduino Pro Micro.



Fonte: elaborada pelo autor.

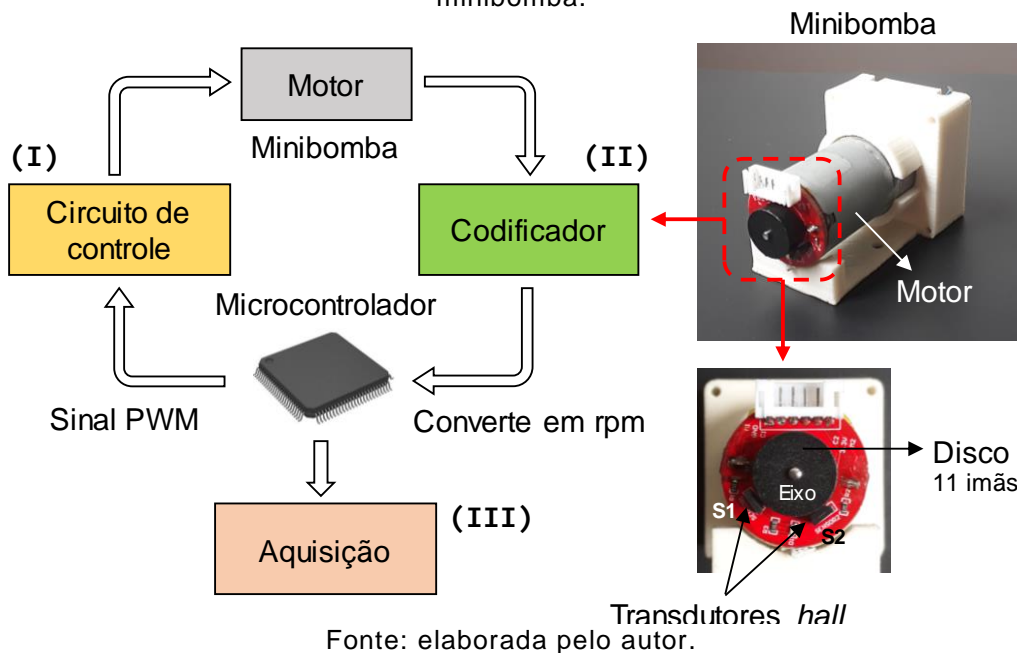
Esse sinal é gerado através de um pulso de onda quadrada, cujo ciclo ativo varia entre 0 a 255 ms. O tempo em que o pulso permanece em nível lógico alto (5V), é dado em porcentagem (*duty cycle* de 0 até 100%) e determina o valor médio de

tensão aplicado ao transistor. Dessa forma, variando o *duty cycle*, é alterado, proporcionalmente, o nível de tensão entregue ao motor, e consequentemente, a velocidade de rotação.

3.5 Medição da Velocidade de Rotação e Aquisição de Dados

Uma ilustração dos procedimentos realizados para medição de velocidade e aquisição dos dados de medição é mostrada na Figura 19. O bloco I, representa o circuito de acionamento (Figura 16), no qual o controle da velocidade do motor em malha aberta é estabelecido.

Figura 19 – Fluxograma da lógica de acionamento e medição da velocidade de rotação da minibomba.



O bloco II representa o codificador de pulsos usado para medir a velocidade de rotação da minibomba. Esse codificador é composto por dois transdutores de efeito *hall* (S1 e S2) e um disco constituído por 11 ímãs igualmente espaçados. Os transdutores são posicionados de forma perpendicular ao disco, onde S1 realiza a medição da velocidade e S2 indica o sentido de giro do eixo. No entanto, considerando que minibomba pode ser operada de forma bidirecional, a leitura de S2 tornou-se desnecessária. Desse modo, os ímãs dispostos sobre o disco, geram uma mudança na sensibilidade de S1, que é codificada através de uma sequência de pulsos elétricos, resultando em um sinal com frequência proporcional à rotação

do eixo. A conversão desse sinal em velocidade rotação foi realizada através uma rotina de programação executada no microcontrolador. Essa rotina faz a contagem do número de pulsos (n_{pulsos}) gerados durante um intervalo de tempo fixo (T_a), e calcula a velocidade do eixo, expressa em rotações por minuto (rpm), empregando a Equação 4.

$$rpm = \frac{60}{T_a 1000} \div \frac{n_{pulsos}}{PPR_{mp}} \quad (4)$$

em que, 60 refere-se ao coeficiente numérico para conversão em minutos, T_a é o tempo de amostragem do sinal em milissegundos, n_{pulsos} é a sequência de pulsos codificada a cada ciclo de interrupção do microcontrolador e PPR_{mp} , como sendo, a razão entre a resolução do codificador de *hall* (11 pulsos por volta) e a redução do motor, cuja relação de transmissão é de 1:32. Assim, $PPR_{mp} = 341,2$ pulsos por revolução.

O bloco III ilustra a aquisição que é realizada da seguinte forma: uma rotina embarcada no microcontrolador processa os dados medidos (sinal PWM e velocidade de rotação em rpm) e através da comunicação serial faz o envio desses dados em um tempo de amostragem fixo T_a . Em seguida, um *script* elaborado no *software* Matlab® faz a recepção dos dados e os armazenam em vetores, cujo tamanho é definido pelo número de amostras N_a . Ao final da aquisição, os dados são exibidos na área de trabalho do *software*, os quais podem ser visualizados. A Tabela 2, descreve a configuração das variáveis usadas para aquisição.

Tabela 2– Configuração das variáveis para aquisição.

Dados da aquisição	Descrição
Sinal PWM	100% do PWM (8 bits ~ 6 V) aplicado ao motor
Velocidade de rotação	Resposta dinâmica da minibomba medida em rpm
T_a	Tempo de amostragem de 100 ms
N_a	1000 amostras
Microcontrolador	ATmega32U4
Tipo de comunicação	USB serial
Velocidade de comunicação	<i>Baudrate</i> 115200

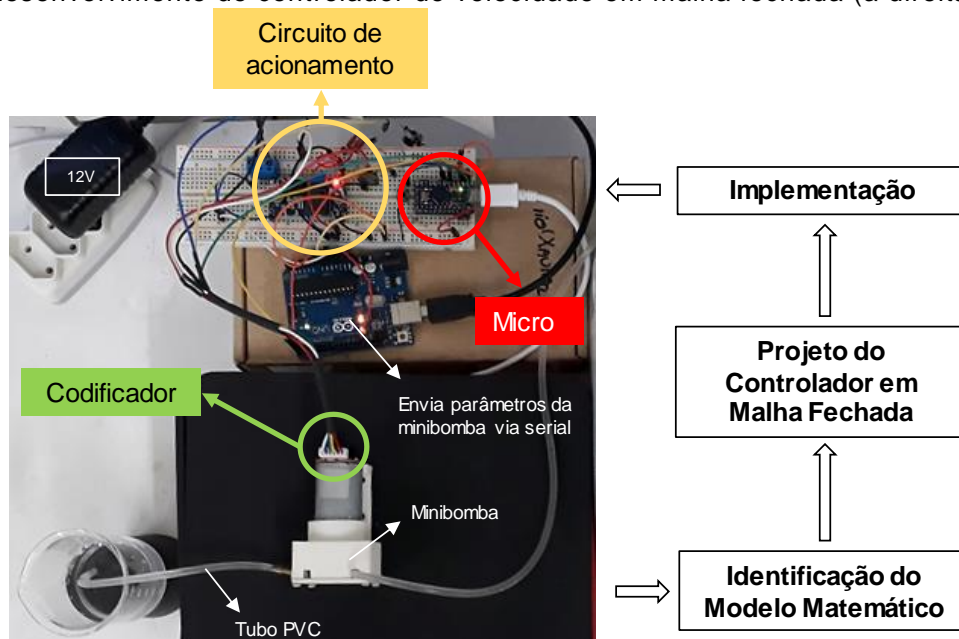
Fonte: elaborada pelo autor.

4. PROPOSTA DE CONTROLE EM MALHA FECHADA

No Capítulo anterior, uma descrição completa do projeto e fabricação do protótipo da minibomba foi apresentada, incluindo os procedimentos empregados para acionamento, medição e aquisição de parâmetros pertinentes à operação da mesma. No presente Capítulo, serão abordadas as etapas de elaboração e implementação de uma estratégia de controle em malha fechada para compensação da velocidade de rotação do atuador na minibomba.

O sistema físico real, composto pela minibomba, circuito de acionamento e sistema para medição de velocidade do eixo, é ilustrado na Figura 20. Na condição atual, a minibomba pode ser normalmente operada, através da variação da tensão aplicada ao motor. Assim, o rotor é acionado e a transferência de fluido é iniciada. No entanto, o método de atuação adotado, induz uma resistência (distúrbios de carga) no motor, ocasionando variações na velocidade de rotação. Esse comportamento foi verificado através do monitoramento em tempo real da velocidade de rotação. Em outras palavras, como a taxa de fluxo produzida é uma medida obtida em função da velocidade de rotação do atuador, o mesmo deve operar de forma constante, afim de otimizar a transferência de fluxo.

Figura 20 – Sistema físico real operando em malha aberta (a esquerda) e etapas para desenvolvimento do controlador de velocidade em malha fechada (a direita).



Fonte: elaborada pelo autor.

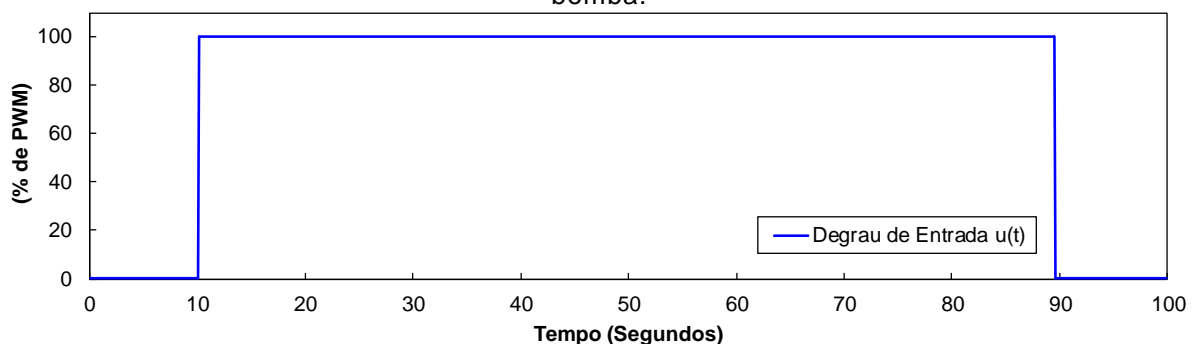
Para manter a velocidade de rotação operando de forma constante, duas estratégias de controladores em malha fechadas serão propostas, consistindo no projeto e implementação de controladores PI (Proporcional e Integral) e PID (Proporcional-Integral-Derivativo).

4.1 Identificação do Modelo Matemático da Minibomba

A representação do modelo matemático de um sistema consiste em três etapas: determinação da estrutura, estimação dos parâmetros e validação (AGUIRRE, 2007). O processo de identificação das variáveis que definem um sistema é uma das etapas mais importantes na construção de um modelo, pois este deve representar de maneira eficiente a sua dinâmica.

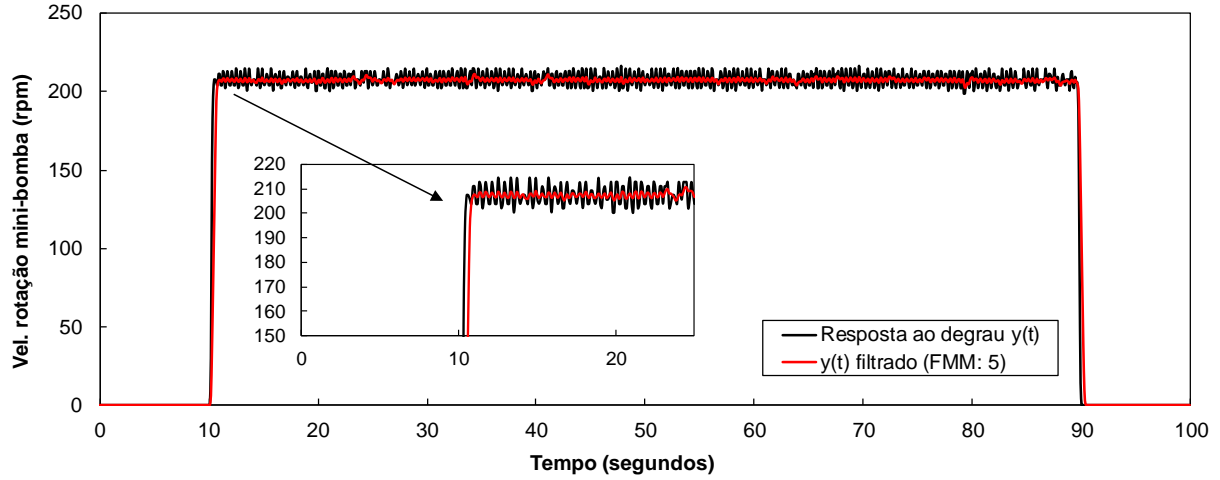
Para identificação do modelo que representa a dinâmica de operação da minibomba em estudo, foram utilizados os dados de entrada, através da representação da variação do sinal PWM, como um degrau de entrada $u(t)$, ilustrado na Figura 21, e saída como a representação de um sinal $y(t)$ que corresponde a resposta dinâmica ao degrau, conforme mostrado na Figura 22. Nesse procedimento, a minibomba foi acionada com a rotação máxima permitida e, após alcançar o estado estacionário, a mesma foi desligada.

Figura 21 – Entrada degrau referente a 100% do valor de tensão fornecida ao motor da bomba.



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 22 – Comparação entre sinal de velocidade de rotação ruidoso e sinal suavizado por filtro de média móvel com $M = 5$.



Fonte: elaborada pelo autor.

Na Figura 22, são mostrados dois sinais relativos à velocidade de rotação. O sinal demonstrado em preto, possui ruídos advindos do mecanismo de atuação, de falhas no codificador de pulsos, vibrações mecânicas, entre outros. Já o sinal mostrado em vermelho, refere-se à velocidade de rotação suavizada através de um filtro de média móvel (FMM), cuja equação de diferença é expressa na Equação 5.

$$y[n] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x[n-k] \quad (5)$$

O filtro foi implementado em ciclos de 100 ms, na qual, M denota a ordem ou o número de ciclos anteriores relativos ao sinal medido para compor a média dos sinais. Assim, fez-se a opção pelo filtro com $M = 5$, pois é verificado um amortecimento excessivo do sinal filtrado para ordens superiores, o que acaba aumentando o tempo de processamento.

Definidas as variáveis de entrada e saída do processo, a próxima etapa consistiu na determinação do modelo matemático representativo. Uma abordagem computacional realizada no *software* Matlab® relaciona as variáveis de entrada $u(t)$ e a saída $y(t)$, gerando uma função de transferência (domínio de Laplace) resultante. Utilizou-se duas metodologias para determinação da função de transferência, cujas equações foram baseadas em modelos de 1ª e 2ª Ordem, conforme descritas nas Equações 6 e 7.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Kp}{\tau s + 1} \quad (6)$$

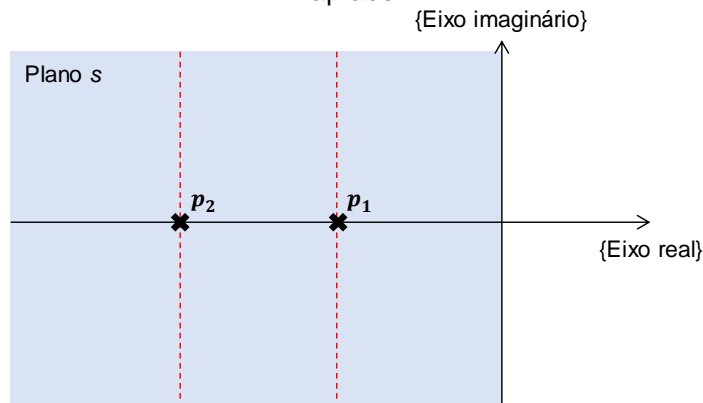
em que, Kp é o ganho da minibomba e τ é o tempo que sistema leva para atingir 60% do valor final.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Kp\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

onde, ω_n é a frequência natural não amortecida e ζ é o coeficiente de amortecimento.

Alguns requisitos devem ser adotados para garantir a estabilidade das funções de transferências, tendo em vista, uma resposta transitória adequada. Esses requisitos são criados a partir da análise dos zeros e pólos que expressam a resposta transitória dos modelos de 1ª e 2ª Ordem. Desse modo, a estabilidade é alcançada quando os pólos de uma função de transferência estão situados no semi-plano esquerdo do plano complexo s , conforme exemplificada na Figura 23, em que os pólos reais p_1 e p_2 , referem-se a um modelo de 2ª Ordem.

Figura 23 – Localização de pólos reais no semi-plano esquerdo do plano complexo de Laplace.



Fonte: elaborada pelo autor.

Um *script* implementado no *software* Matlab, Figura 23, realiza a estimação dos modelos de transferência da minibomba através do comando '*tfest*'.

A estimação dos modelos foi realizada através de uma simulação computacional, cuja implementação é mostrada na Figura 24. A função '*tfest*' faz a estimação dos modelos, a partir dos dados de entrada e saída da minibomba e dos requisitos

estabelecidos para que os mesmos atinjam uma resposta transitória adequada. Esses requisitos foram fixados a partir do número de zeros e pólos de cada modelo. Após a execução da simulação, duas funções de transferências são geradas, conforme descritas nas Equações 8 e 9.

Figura 24 – *Script* para estimação dos modelos de transferência da minibomba.

```
clear all;
clc;
close;

% Importa os dados de entrada e saída
load data_io

%Estimação modelo de 1ª Ordem
nz1 = 0;
np1 = 1;
modell1Ordem = tfest(data_io, np1, nz1);

%Estimação modelo de 2ª Ordem
nz2 = 0;
np2 = 2;
model2Ordem = tfest(data_io, np2, nz2);

%Compara a saída com o modelo estimado
compare(data_io, modell1Ordem, model2Ordem);
xlabel('Tempo (segundos)'),ylabel('Velocidade (rpm)')
```

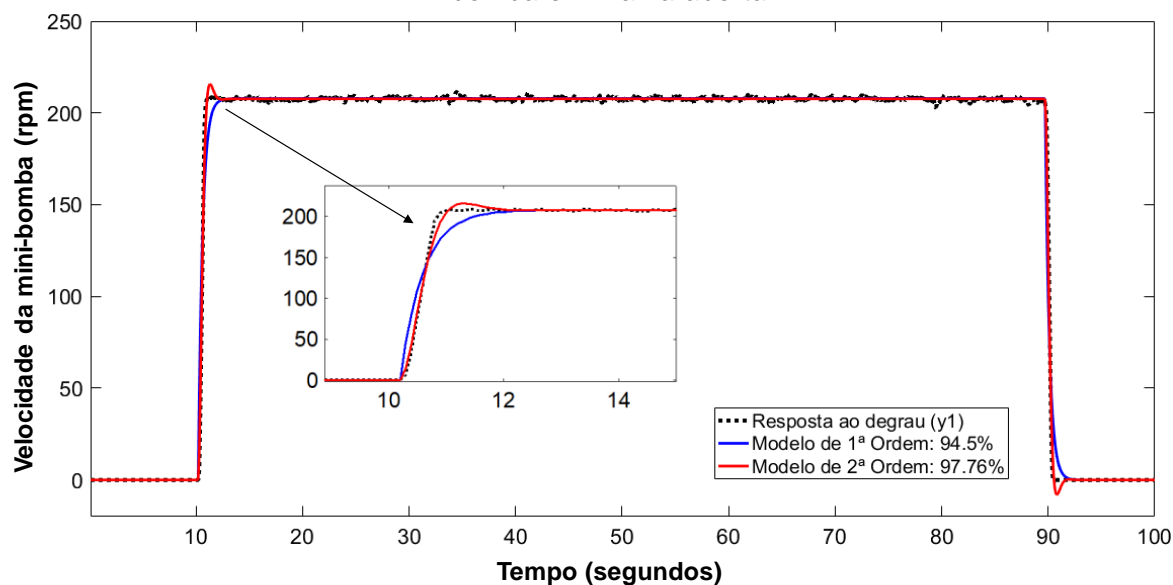
Fonte: elaborada pelo autor.

$$G_{m1}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{5,21}{s + 2,506} \quad (8)$$

$$G_{m2}(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{34,31}{s^2 + 5,836s + 16,52} \quad (9)$$

De acordo com os requisitos definidos na simulação, verificam-se nas Equações 8 e 9, a ausência de zeros nos numeradores, isso significa dizer que os valores obtidos se caracterizam como constantes. Por outro lado, os denominadores possuem: um pólo localizado em $\sigma_{m1} = -2,506$ para o modelo de 1ª Ordem e dois pólos complexos conjugados, situados em $\sigma_{1m2} = -2,9180 + 2,8301j$ e $\sigma_{2m2} = -2,9180 - 2,8301j$ para o modelo de 2ª Ordem. Na Figura 25, é ilustrado a comparação entre a saída real $y(t)$ e as funções de transferências adquiridas.

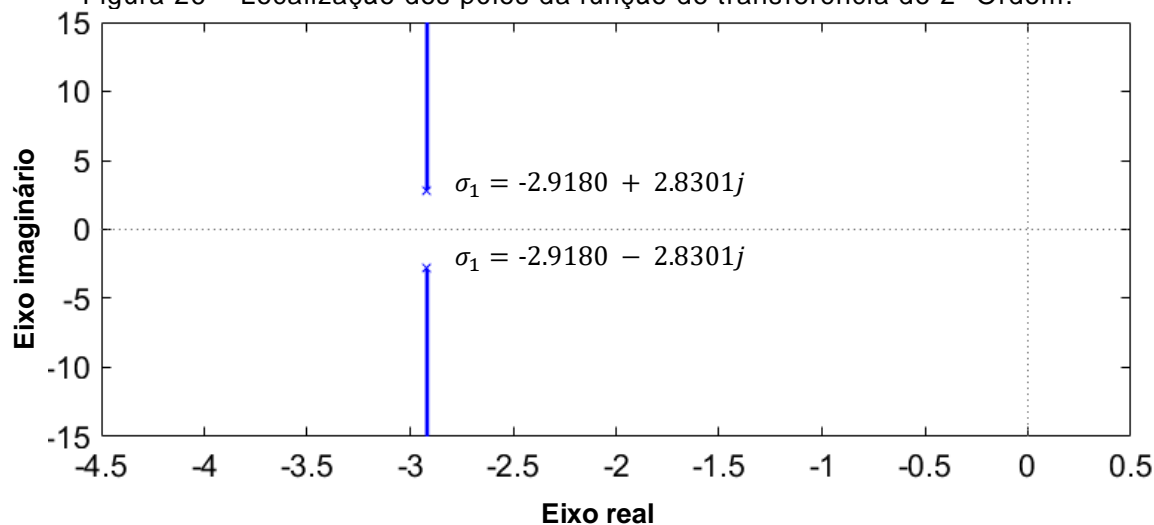
Figura 25 – Comparação dos modelos de 1ª e 2ª ordem em função da resposta dinâmica da minibomba em malha aberta.



Fonte: elaborada pelo autor.

Aplicado o método computacional, a estimação dos modelos de 1ª e 2ª Ordem obtiveram uma exatidão de 94,5% e 97,76%, respectivamente. Em razão disso, adotou-se o modelo de 2ª ordem para obtenção do controlador em malha fechada, pois verificou-se uma maior aproximação com a resposta dinâmica da minibomba em estudo. A Figura 26, mostra a localização dos pólos reais complexos resultantes da Equação 9, na qual é possível visualizar a região de estabilidade do modelo escolhido.

Figura 26 – Localização dos pólos da função de transferência de 2ª Ordem.



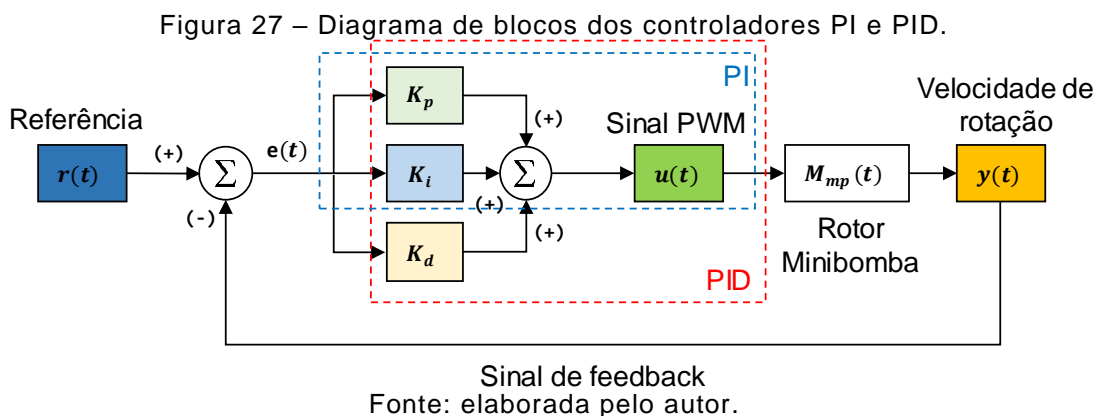
Fonte: elaborada pelo autor.

4.2 Desenvolvimento das Estratégias de Controle PI e PID

Como mencionado na Seção 1.2, o objetivo principal dessa dissertação é projetar e implementar um sistema de controle em malha fechada com a finalidade de compensar a velocidade de rotação de uma bomba peristáltica miniaturizada, a fim de minimizar incorreções na taxa de fluxo produzida. Nesse sentido, após o estudo do comportamento e através da identificação do modelo dinâmico da minibomba, o projeto dos controladores PI e PID deve atender a seguintes exigências:

- Obtenção de uma resposta dinâmica amortecida, o qual se obtenha uma mudança gradual da tensão elétrica aplicado ao motor, visto que uma variação brusca de tensão aplicada pode gera perturbações na taxa de fluxo;
- A ação imposta pela estratégia de controle deve estabilizar na trajetória de referência atingindo um *overshoot* menor que 2% do valor final. O *overshoot* (sobre-sinal) expressa o quanto o valor da resposta em regime permanente pode ultrapassar a trajetória de referência. Nesse sentido, o *overshoot* de 2% é um requisito de projeto para o controlador alcance a estabilidade.

As ações dos controladores PI e PID, são exemplificadas no diagrama de blocos ilustrado pela Figura 27. O bloco $r(t)$ é a referência na qual a velocidade de rotação deve alcançar e estabilizar. A faixa de velocidade de rotação usada para a referência varia de 150 até 200 rpm. Os blocos representativos dos controladores são descritos matematicamente nas Equações 11 e 12. O bloco $M_{mp}(t)$ representa a dinâmica de operação da minibomba, cuja função de transferência é descrita na Equação 9.



De forma semelhante, os controladores PI e PID realizam a compensação do erro estacionário gerado pelo desvio entre referência $r(t)$ e saída atual $y(t)$, conforme a Equação 10.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (10)$$

Assim, a compensação é feita através do ajuste da entrada $u(t)$, isto é, a tensão aplicada ao motor da minibomba corrigida de modo que a velocidade de rotação $y(t)$ tenda a se igualar ao valor de $r(t)$, o que resulta na minimização e/ou eliminação do erro $e(t)$. Matematicamente, as equações descritivas que caracterizam o referido ajuste são dadas pelas Equações 11 e 12.

$$PI \therefore u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (11)$$

$$PID \therefore u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (12)$$

em que, K_p , K_i e K_d são constantes e denotam os termos proporcional, integral e derivativo. De forma equivalente, as funções de transferências descritivas dos controladores PI e PID, no domínio de Laplace, são descritas nas Equações 13 e 14.

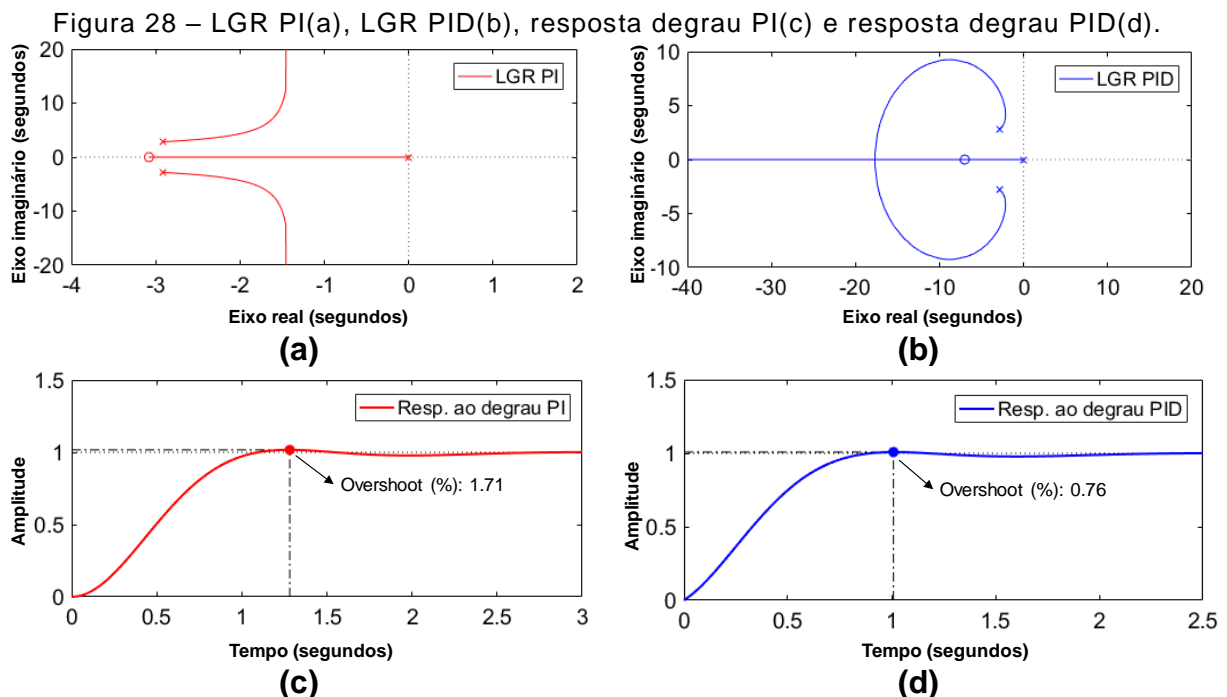
$$C_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (13)$$

$$C_{PID}(s) = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (14)$$

As constantes descritas nas equações anteriores têm por finalidade fazer o que os controladores atinjam a estabilidade. Nesse sentido, os valores atribuídos as constantes devem ser bem sintonizadas. Para isso, a sintonia dos controladores foi realizada através de métodos robustos disponíveis no *software* Matlab®, pela ferramenta gráfica *rltool*. Nessa ferramenta, a função de transferência de um determinado processo é fornecida, e a partir dela, é calculado o Lugar Geométrico

das Raízes (LGR). O LGR é uma técnica que visa representar graficamente o deslocamento dos pólos de malha fechada de um sistema linear quando sujeito a variação de um ou mais parâmetros (OGATA e SEVERO, 1998).

Para determinação das constantes dos controladores propostos, a função de transferência da minibomba (Equação 9) foi executada pelo comando `'rltool'`. Em seguida, uma tela gráfica composta pela resposta ao degrau e o LGR da mesma é apresentada. Um método de sintonia baseado nos controladores PI (Equação 11) e PID (Equação 12) foi escolhido e aplicado a função de transferência, resultando na representação em malha fechada dos controladores por meio de seus LGRs e respostas degraus. A localização dos pólos para cada controlador foi alterada de modo que a sua resposta ao degrau obtivesse um *overshoot* (sobre-sinal) menor que 2%. Os LGRs representativos dos controladores PI e PID em malha fechada são ilustrados nas Figuras 28(a) e 28(b). As respostas degraus resultantes das manipulações dos pólos são mostradas graficamente nas Figuras 28(c) e 28(d).



Fonte: elaborada pelo autor.

Nas Figuras 28(a) e 28(b) verificam-se a região de estabilidade e o limiar na qual é possível deslocar os pólos. Por definição, a função de transferência da minibomba (Equação 9) possui dois pólos, visto que a mesma é um modelo de 2ª Ordem. No entanto, com a inserção dos controladores em malha fechada, é adicionado um

terceiro pólo na origem do semi-plano esquerdo com o propósito de eliminar o erro estacionário para uma entrada degrau, como são observadas nas Figuras 28(c) e 28(d). As ações de controle alcançam a estabilidade apresentando um *overshoot* de 1,71% para o PI e de 0.76% para o PID. A Tabela 3 descreve as constantes K_p , K_i e K_d sintonizadas automaticamente a partir da alocação dos pólos em malha fechada.

Tabela 3 - Constantes de sintonia para os controladores PI e PID

Constantes	PI	PID
K_p	0,407	2,97
K_i	4,3	10,04
K_d	-	0,212

Fonte: elaborada pelo autor.

Terminada a etapa de modelagem e sintonização das constantes dos controladores, a próxima etapa contemplou a implementação dos controladores em um dispositivo embarcado.

4.3 Implementação dos Controladores PI e PID

Os controladores PI e PID foram implementados em um microcontrolador ATmega32U4, através um algoritmo desenvolvido em Linguagem C. Na Figura 29, é mostrado um fluxograma que contém a lógica de funcionamento do algoritmo de controle.

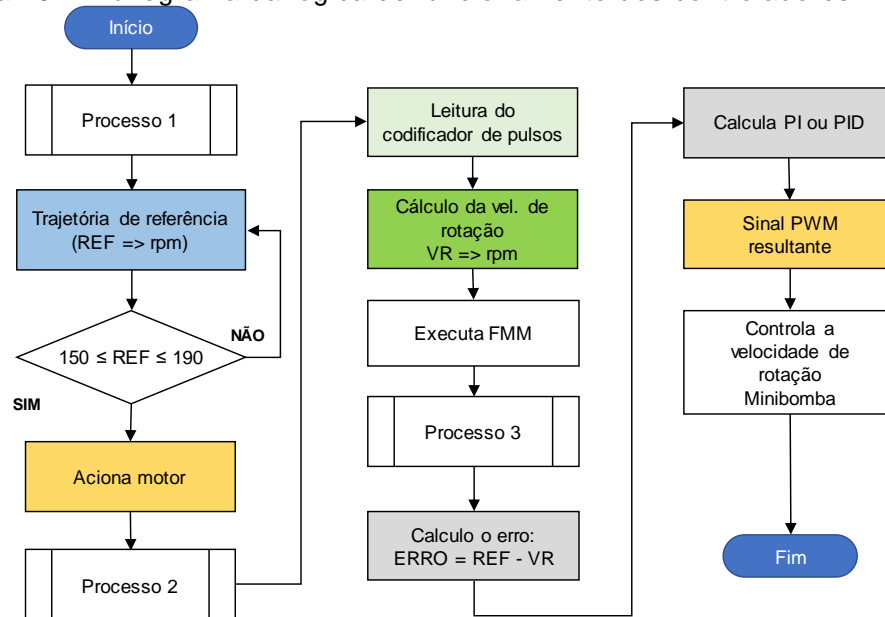
No Processo 1, o microcontrolador recebe a trajetória de referência do controlador (REF) e verifica se o valor recebido está dentro do limiar estabelecido para atuação do controlador, que varia de 150 até 190 rpm. Em caso positivo, a minibomba é acionada, dando início ao Processo 2. Caso contrário, permanece desligada.

O Processo 2, realiza a medição da velocidade de rotação atual da minibomba através da variável VR. A taxa de amostragem utilizada na mediação foi de $T_a = 100$ ms. Ao final da medição, VR é gravada no Processo 3.

O Processo 3, é uma função que realiza os cálculos dos algoritmos PI e PID. A função recebe os valores atribuídos a REF e VR, e através dessas variáveis, o ERRO comum aos controladores PI e PID foi determinado. Para corrigir o ERRO, a função calcula o ajuste da saída PWM, empregando as Equações 11 e 12. O cálculo é processado em intervalos de 100 ms. A escolha desse intervalo concorda com a

taxa de amostragem (T_a) usada para medição de VR. O microcontrolador gera o sinal de PWM, baseado na correção imposta pelo algoritmo escolhido, que realiza o acionamento o motor da minibomba. Assim, a partir de uma entrada REF desejada, o ERRO gerado é minimizado até que VR atinja estabilidade em REF.

Figura 29 – Fluxograma da lógica de funcionamento dos controladores PI e PID.



Fonte: elaborada pelo autor.

Finalizada a criação e implementação dos algoritmos, a próxima etapa contemplou a realização de testes experimentais com a minibomba.

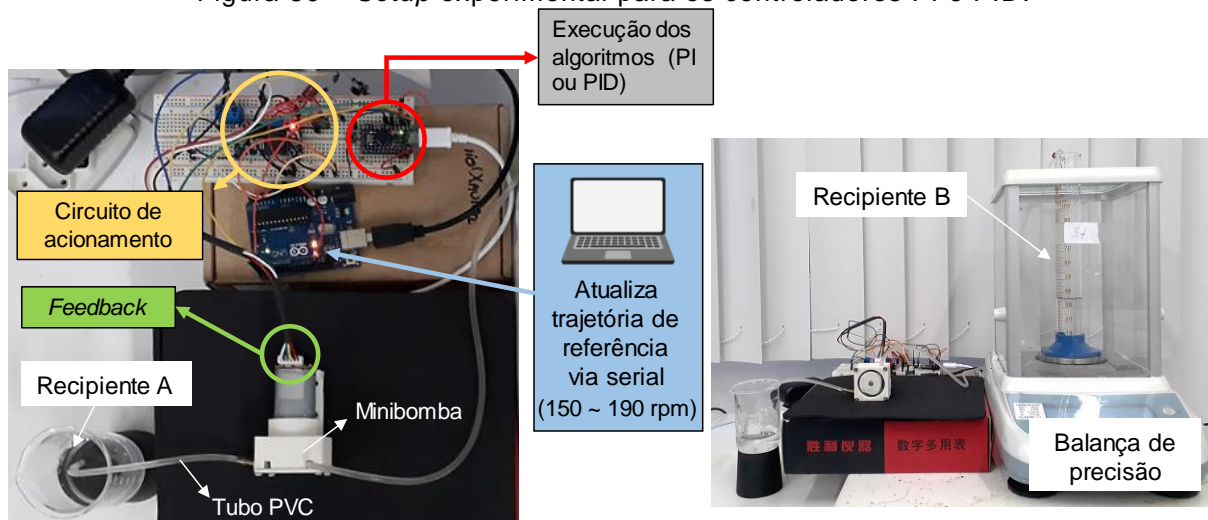
5. RESULTADOS OBTIDOS

Este Capítulo apresenta os resultados obtidos, iniciando pela caracterização experimental da minibomba peristáltica proposta. Os resultados decorrentes das estratégias de controle implementadas são apresentados e discutidos. Também foi realizado a obtenção da taxa média de fluxo fornecida pela minibomba operando com a compensação de velocidade de rotação.

5.1 Setup experimental para caracterização da minibomba

Para uma maior compreensão dos testes experimentais, um *setup* composto pelo sistema físico real, é mostrado na Figura 30. O mesmo foi montado para obtenção dos resultados para validação dos controladores propostos, descritos na Seção 4.2, como também para determinação da taxa média de fluxo entregue pela minibomba, conforme a Seção 4.3.

Figura 30 – Setup experimental para os controladores PI e PID.



Fonte: elaborada pelo autor.

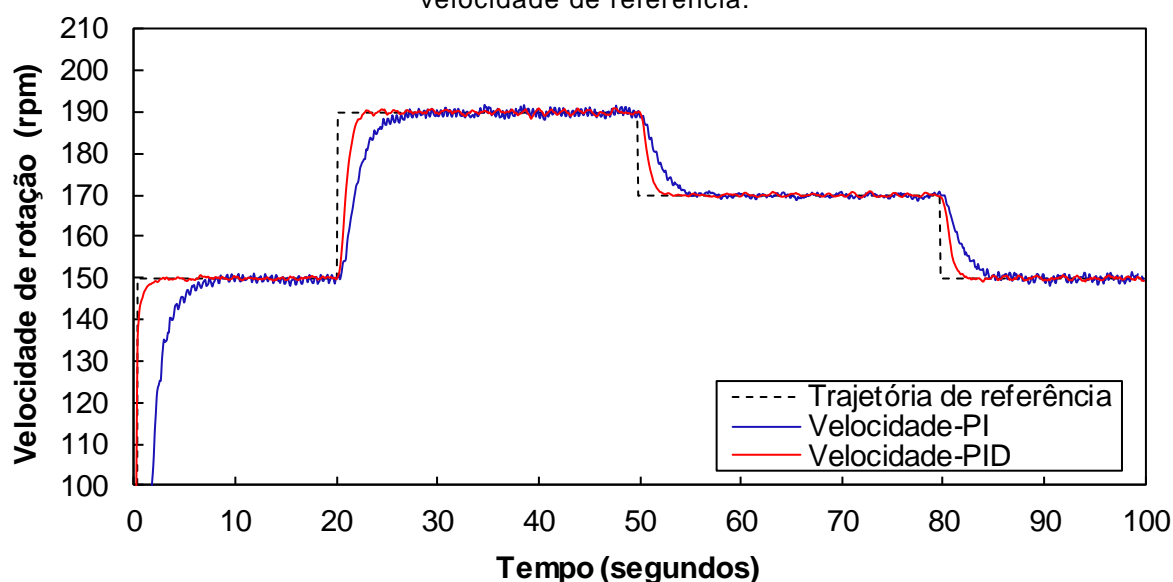
Os procedimentos experimentais foram realizados da seguinte forma: um computador conectado via comunicação serial com microcontrolador ATmega32U4, fornece a trajetória de referência desejada, cujo intervalo varia de 150 até 190 rpm. Ao receber essa informação, o microcontrolador executa o algoritmo de controlador gravado em sua memória, iniciando pelo controlador PI e depois o PID. A ação gerada pelos algoritmos, produz um sinal PWM que, ao ser transmitido pelo circuito de acionamento através tensão elétrica proporcional, mantém em regime

permanente a velocidade de rotação do rotor da minibomba. O *encoder* realiza a medição da velocidade de rotação e atualiza o microcontrolador. Após a caracterização do controle e atuação, realizaram-se experimentações para avaliar a capacidade de transporte fluídico da minibomba. Para tanto, a minibomba foi configurada para transportar um volume de fluido, cerca de 50 ml de água do recipiente (A) para o recipiente (B), como ilustrado na Figura 30. O recipiente (B) foi posicionado sob uma balança de precisão de modo que a massa do volume de fluido fosse mensurada. Ao final de cada procedimento, o microcontrolador envia os dados de medição, sendo a trajetória de referência e velocidade de rotação atual para computador, onde são processados e armazenados.

5.2 Desempenho das Estratégias de Controle PI e PID

Após a configuração do *setup* experimental, as estratégias de controle adotadas foram testadas. A referência da velocidade de rotação foi variada e a compensação imposta pelos algoritmos PI e PID mensurada. Na Figura 31, são mostrados os gráficos das respostas degraus dos controladores para uma trajetória de referência variada.

Figura 31 – Desempenho das estratégias de controle PI e PID em função da variação da velocidade de referência.



Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando-se os gráficos mostrados na Figura 31, verificou-se que a ação de controle de ambas as estratégias, satisfaz o requisito de projeto estabelecido. Isso

foi constatado através do comportamento amortecido em todas as trajetórias de referência, o que infere uma partida suave no motor. Em relação ao tempo de estabilização, são distintos. O controlador PI apresentou um maior tempo para alcançar estabilidade, cerca de 8 s. Enquanto o controlador PID, estabilizou em aproximadamente 3 s. Embora o tempo de estabilização seja um fator crucial para o desempenho de controladores em malha fechada, nesse projeto, esse parâmetro não demonstrou grande influência, visto que, uma mudança rápida do nível de tensão aplicada ao motor, resultaria na agitação do fluido durante a transferência e, portanto, não sendo um comportamento desejado.

Uma medida para avaliar a acurácia dos controladores PI e PID, foi determinada através do Erro Médio Quadrático (*Mean Square Error* – MSE). O EMQ é calculado pela diferença entre a trajetória de referência (V_{ref}) e a velocidade de rotação atual da minibomba (V_{ra}) ao quadrado e em função do número de amostras (N), conforme definido na Equação 15.

$$EMQ = \frac{1}{N} \sum (V_{ref} - V_{ra})^2 \quad (15)$$

Assim, V_{ref} foi configurada em incrementos de 10 rpm e para cada incremento foram armazenadas $N = 1000$ amostras de V_{ra} estabilizada em intervalos de aproximadamente 100 s. Após a captura das medidas, os EMQs foram determinados e são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Erros Médios Quadráticos para todas as trajetórias de referência testada.

V_{ref} (rpm)	EMQ (PI)	EMQ (PID)
150	0,6522	0,6135
160	0,5932	0,5434
170	0,4567	0,3497
180	0,3291	0,2456
190	0,2600	0,1843

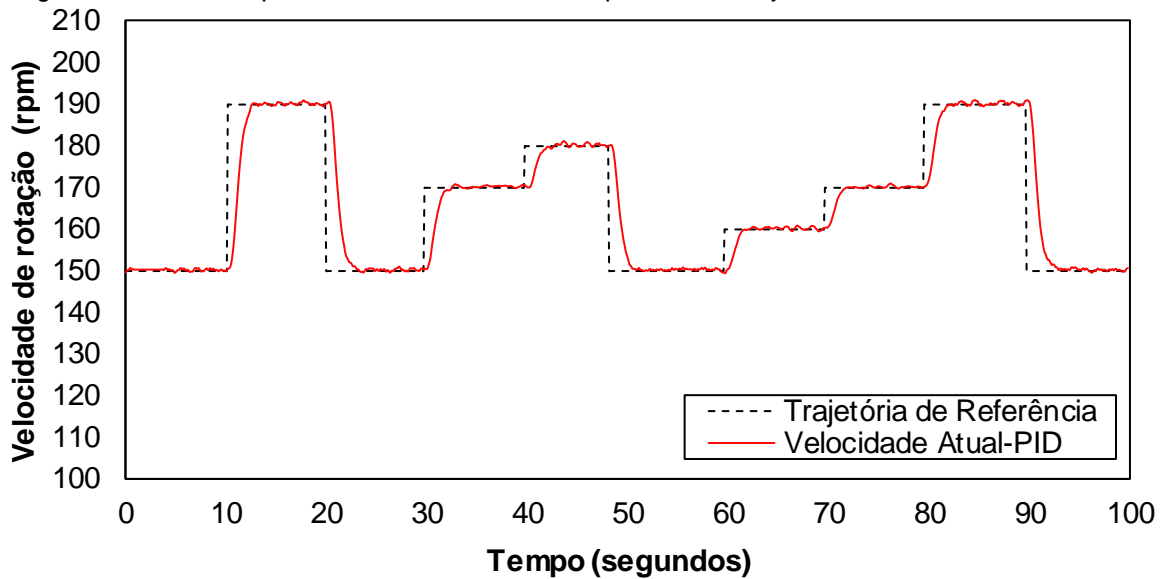
V_{ref} = Velocidade de referência do controlador; EMQ (PI) = Erro Médio Quadrático Controlador PI; EMQ (PID) = Erro Médio Quadrático Controlador PID.

Fonte: elaborada pelo autor.

Pode-se observar na Tabela 4, que os EMQs se mantiveram próximo a zero em praticamente todas as trajetórias de referência. Quando ocorreram variações

consideráveis no seu valor, como mostrado na Figura 31, os controladores rapidamente atuaram compensando V_{ra} para um valor igual ou muito próximo de zero. Com base nos parâmetros avaliados, verificou-se que o controlador PID possui de fato, um maior desempenho em comparação com o controlador PI. Para efeito demonstrativo, na Figura 32, é ilustrado o comportamento do controlador PID, cuja obtenção foi realizada de forma isolada para uma trajetória de referência variada.

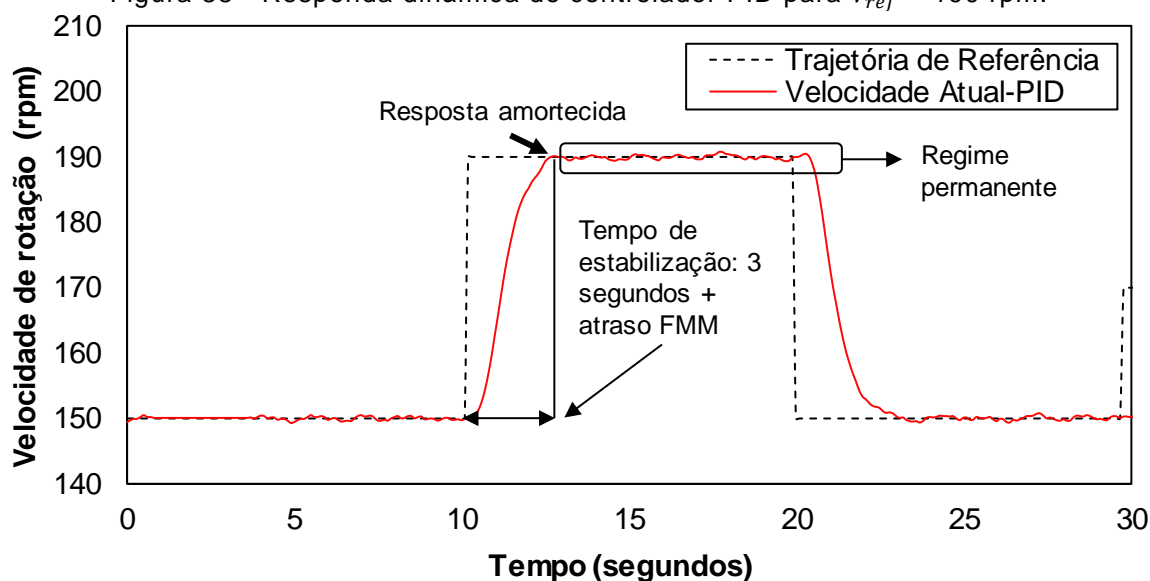
Figura 32 – Desempenho do controlador PID para uma trajetória de referência variada.



Fonte: elaborada pelo autor.

Uma análise mais detalhada, que buscou-se evidenciar a resposta dinâmica do controlador PID para um dado valor de referência, $V_{ref} = 190$ rpm, é ilustrado na Figura 33. Observou-se um atraso de cerca de 2s imposto ao tempo de estabilização do controlador. A ocorrência desse atraso é explicada pelo tempo que o microcontrolador usa para processar o FMM (ordem $M = 5$) empregado para suavização do sinal de velocidade enviado para o controlador. Outro ponto observado, diz respeito a presença de pequenas variações de posições ocasionadas em regime permanente. Nesse caso, como a estratégia de controle em malha fechada proposta não elimina, mas sim, minimiza os efeitos dos movimentos peristálticos, supõem-se que essas variações ocorrem devido a ruídos no codificador de pulsos e/ou vibrações mecânicas causadas pelo conjunto de rolos.

Figura 33 - Resposta dinâmica do controlador PID para $V_{ref} = 190$ rpm.



Fonte: elaborada pelo autor.

5.3 Determinação da Taxa Média de Fluxo

Efetuuou-se um estudo para determinação da taxa média de fluxo produzida pela minibomba. Para tanto, foram realizadas 5 repetições em que se variou a velocidade de referência do rotor em incrementos de 10 rpm. Para cada repetição, um volume fixo de água, cerca de 50 ml, foi transportado e a massa mensurada ao final de um determinado tempo. A massa foi medida por meio de uma balança de precisão, modelo LW203i (fabricada pela BEL ENGINEERING®), disponibilizada pelo Laboratório de Química do IFPB. Os valores experimentais referentes a massa e o tempo decorrido de cada transferência foram registrados.

A massa do volume transportado em cada repetição foi convertida para volume real medido, através da Equação 16,

$$V_{mp} = \frac{m_v}{\rho_v} \quad (16)$$

em que, (m_v) é a massa medida em gramas e (ρ_v) é a massa específica da água a 22°C, o que representa a temperatura média do laboratório durante os experimentos. Desse modo, a taxa média de fluxo pode ser empiricamente calculada, pela razão entre o volume real medido e o tempo decorrente para transferência, conforme a Equação 1. Os valores experimentais e calculados empregados para determinação da taxa média de fluxo são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 – Medidas experimentais para determinação da taxa média de fluxo para tubo de diâmetro interno de 2,06 mm.

V_{ref} (rpm)	m_v (g)	T_e (s)	\forall_{mp} (ml)	Q_{mp} (ml/min)
150	49,0417	336	49,15	8,777
160	49,0232	277,8	49,13	10.611
170	48,6812	238,8	48,79	12.258
180	49,0069	211.8	49,11	13.913
190	48,8947	186,6	49,00	15.756

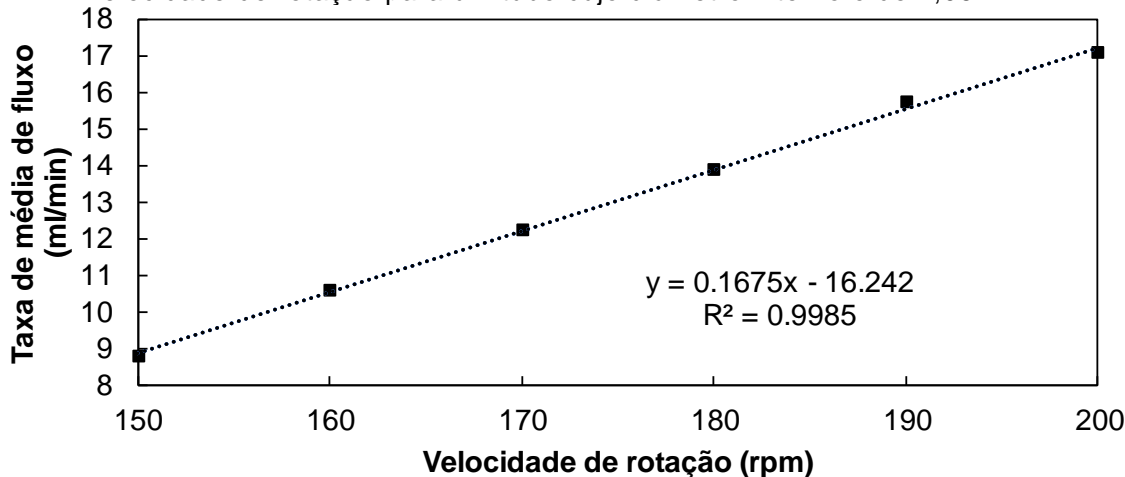
Massa específica da água a 22°C $\rho_a = 0,99782$ g/ml (Lide, 2005)

V_{ref} = Velocidade de referência do controlador; m_v = Massa volumétrica; T_e = Tempo de execução; \forall_{mp} = Volume medido; Q_{mp} = Taxa média de fluxo da minibomba peristáltica.

Fonte: elaborada pelo autor.

Uma representação gráfica da taxa média de fluxo em função da velocidade de rotação produzida pela minibomba, é ilustrada na Figura 34.

Figura 34 – Representação gráfica da curva de calibração da taxa de fluxo em função da velocidade de rotação para um tubo cujo diâmetro interno é de 2,06 mm.



Fonte: elaborada pelo autor.

Através da indicação gráfica apresentada na Figura 34, pode-se observar que há uma linearidade entre a taxa média de fluxo em função do aumento da velocidade de rotação, apresentando ainda, uma correlação positiva forte $R^2 = 0,9985$. Em outras palavras, cerca de 99% da variação de fluxo é dependente da velocidade de rotação configurada. Vale ressaltar, que as velocidades configuradas no experimento foram compensadas através do controlador PID.

Para velocidades inferiores a 150 rpm, verificou-se que o motor apresentava uma certa dificuldade para girar o rotor da minibomba, devido ao atrito imposto pelo tubo de PVC, o que resultou em falhas na transferência de fluido. Em razão disso,

justifica-se a faixa de velocidades usada no experimento. No entanto, a taxa de fluxo, cujo intervalo médio variou de 8,777 ml/min até 15,756 ml/min, obtida em função da faixa de velocidades configuradas, foi considerada elevada para aplicações baseadas em biossensores SPR, visto a possibilidade de ocasionar incorreções nos diagnósticos ou ainda causar danos na região de detecção desses biossensores. Por outro lado, não existe uma taxa de fluxo padronizada para biossensores SPR, o que normalmente se aplicam, são vazões que variam de centenas de $\mu\text{l/min}$ até poucos ml/min.

Uma solução para reduzir a taxa de fluxo produzida pela minibomba, afim de se obter um fluxo volumétrico adequado para o funcionamento de biossensores SPR, consistiria, primeiramente, na caracterização de tubos com maior flexibilidade e que possuam diâmetros internos em ordem micrométrica. Isso permitiria suprir a deficiência de torque gerada pelo motor, como também, a possibilidade de atuar em velocidades menores que 150 rpm. Entretanto, algumas limitações como: tempo, disponibilidade comercial e ausência de recursos financeiros para aquisição de componentes apropriados, impossibilitaram a realização de testes experimentais que pudessem validar a solução proposta.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa dissertação consistiu no projeto e construção de uma minibomba peristáltica baseada em rolos, a qual foram realizados o estudo e implementação de estratégias de controle retroativo para compensação da velocidade de rotação do rotor do equipamento, tendo em vista, a minimização de distúrbios de carga impostos ao fluído.

A construção da minibomba foi realizada utilizando tecnologia de impressão 3D, o que possibilitou um baixo custo de projeto, redução das dimensões físicas e peso da estrutura, além da capacidade de reprodução em massa. A estrutura portátil, permite ainda a inserção em dispositivos miniaturizados para análise em fluxo, e por produzir um reduzido fluxo de fluido, permite uso de pequenas amostras.

Os circuitos de controle e atuação empregados nesse projeto, são de simples funcionamento, o que incluiu um microcontrolador e um circuito de acionamento. O motor usado para acionar a minibomba, possui um codificador de pulsos acoplado ao eixo, utilizado para mensurar a velocidade de rotação do rotor da minibomba. Com isso, foi possível realizar o estudo para extração do modelo matemático representativo da dinâmica de operação, e consequentemente, o projeto e implementação de estratégias de controles apropriadas. As estratégias de controles propostas, basearam-se na metodologia de controladores PID, na qual, fez-se o estudo e implementação dos controladores PI e PID, respectivamente.

Com base no modelo matemático que alcançou uma precisão de 97,76%, realizou-se a estimação dos parâmetros dos controladores, obtendo-se uma resposta adequada. Os resultados obtidos de forma experimental, demonstraram que a metodologia proposta satisfaz o objetivo. Os controladores atuaram com a finalidade de compensar a velocidade de rotação, de modo estabilizá-la em um valor pré-estabelecido. Isso é evidente nos valores de EMQs obtidos para ambos controladores. A faixa de velocidade a qual é feita a compensação varia de 150 até 190 rpm. Para essa variação a minibomba produz uma taxa fluxo volumétrico, cujo intervalo médio foi de 8 até 17 ml/min, apresentando uma linearidade de 99%.

6.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

As sugestões para melhoria deste trabalho e propostas futuras são descritas a seguir:

- Projetar uma estrutura que permita utilizar diferentes perfis de tubos, e assim, obter taxas de fluxo ainda mais reduzidas;
- Realizar testes experimentais com diferentes fluidos viscosos com propósito de avaliar a mudança na taxa de fluxo devido a diferença de viscosidade dos fluidos.
- Verificar a influência da pressão sob taxa de fluxo;
- Utilizar um codificador de pulsos com uma maior resolução e sensibilidade à ruídos;
- Mensurar a velocidade de fluxo produzida pela minibomba através de um sensor de fluxo micromecanizado e desenvolver um controlador em malha fechada capaz de operar em conjunto com o controlador de velocidade de rotação;
- Implementar outras metodologias de controle, como aquelas baseadas em algoritmos genéticos, redes neurais, controladores repetitivos e nebulosos.

BIBLIOGRAFIA

Additive Manufacturing: Strategic Research Agenda. 2014. Disponível em <
<https://www.rm-platform.com/linkdoc/AM%20SRA%20-%20February%202014.pdf>>
Acessado em: 15. nov. 2018.

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à identificação de sistemas–Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. 3.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

ALAM, Muhd Nazrul Hisham Zainal et al. Design and fabrication of a 3D printed miniature pump for integrated microfluidic applications. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 18, n. 9, p. 1287-1296, 2017.

ATMEL. **ATmega16U4/ATmega32U4**. 2018. Disponível em: <
http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-7766-8-bit-avr-atmega16u4-32u4_datasheet.pdf> Acesso em: 03 de novembro de 2018.

BARRETO NETO, A. G. S. **Contribuição ao projeto de sistemas de propulsão de fluidos**. 2013. 230 f. Tese (doutorado), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2013.

BARRETO NETO, G. S. et al. Projeto e desenvolvimento de uma bomba peristáltica linear para aplicação em biossensores baseados na ressonância de plasma de superfície. **Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática**, Campina Grande, p. 3295-3300, 2012.

BERG, J. M; DALLAS, T. Peristaltic Pump. **Springer Science**, New York, 2013.

BISHOP, Robert H.; DORF, Richard C. Modern control systems. **River, New Jersey: Prentice Hall**, 2004.

COGNOLATO, Matteo et al. Multifunction control and evaluation of a 3D printed hand prosthesis with the Myo armband by hand amputees. **bioRxiv**, p. 445460, 2018.

DIAS JÚNIOR, J. C. **Projeto e desenvolvimento de minibomba peristáltica usando medição de vazão, aplicada a biossensores**. 2016. 55 f. Dissertação (Mestrado), Instituto Federal da Paraíba, Paraíba, 2016.

FRIEDMAN, Tamir et al. 3D printing from diagnostic images: a radiologist's primer with an emphasis on musculoskeletal imaging—putting the 3D printing of pathology into the hands of every physician. **Skeletal radiology**, v. 45, n. 3, p. 307-321, 2016.

HCH BEARINGS. **Produtos HCH: Rolamentos de Esfera Rígida**. (Catálogo). Disponível em < <https://www.hchbearing.com/leajax/gotoDownload.aspx?d=167> > Acessado em: 20. ago. 2018.

HOMOLA, Jiří. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species. **Chemical reviews**, v. 108, n. 2, p. 462-493, 2008.

HOMOLA, Jiří; PILIARIK, Marek. Surface plasmon resonance (SPR) sensors. In: **Surface plasmon resonance based sensors**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. p. 45-67.

HULL, Charles W. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. U.S. Patent n. 4,575,330, 11 mar. 1986.

INGESSON, Gabriel; SANDBERG, Helena. **Speed control of a peristaltic blood pump**. ISSN 0280-5316, 2013.

IVERSON, Brian D.; GARIMELLA, Suresh V. Recent advances in microscale pumping technologies: a review and evaluation. **Microfluidics and nanofluidics**, v. 5, n. 2, p. 145-174, 2008.

JARIWALA, Shailly H. et al. 3d printing of personalized artificial bone scaffolds. **3D printing and additive manufacturing**, v. 2, n. 2, p. 56-64, 2015.

KADIMISSETTY, Karteek et al. Automated 4-sample protein immunoassays using 3D-printed microfluidics. **Analytical Methods**, v. 10, n. 32, p. 4000-4006, 2018.

KIM, Seungwoo et al. A Study on Fuzzy Adaptive Control of Enteral Feeding Pump. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 62, p. 620-623, 2012.

LAKE, John R.; HEYDE, Keith C.; RUDER, Warren C. Low-cost feedback-controlled syringe pressure pumps for microfluidics applications. **PloS one**, v. 12, n. 4, p. e0175089, 2017.

LIDE, David R. et al. **CRC Handbook of Chemistry and Physics**. Boca Raton: CRC Press, FL, 2005.

MATOS, Renato C. et al. Propulsor pneumático versátil e isento de pulsação para sistemas de análise em fluxo. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 795-798, 2001.

MOREIRA, C. S. **Projeto e realização de um biochip óptico para aplicações biológicas baseado no princípio de ressonância de plásmons de superfície**. 2010. 136 f. Tese (doutorado), Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2010.

NGUYEN, N. T.; WERLEY, S. T. **Fundamentals and applications of microfluidics**. Norwood, MA: Artech House, 2002.

OGATA, Katsuhiko; SEVERO, Bernardo. **Engenharia de controle moderno**. Prentice Hall do Brasil, 1998.

OH, Sein et al. 3D-printed capillary circuits for rapid, low-cost, portable analysis of blood viscosity. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 259, p. 106-113, 2018.

OLIVEIRA, Leiva Casemiro et al. **Surface plasmon resonance sensors: a materials guide to design and optimization**. Springer, 2015.

PARTHASARATHY, Jayanthi. 3D modeling, custom implants and its future perspectives in craniofacial surgery. **Annals of maxillofacial surgery**, v. 4, n. 1, p. 9, 2014.

PLEVNIK, Kimberly et al. 3D printed auto-mixing chip enables rapid smartphone diagnosis of anemia. **Biomicrofluidics**, v. 10, n. 5, p. 054113, 2016.

SHARAFELDIN, Mohamed; JONES, Abby; RUSLING, James. 3D-Printed Biosensor Arrays for Medical Diagnostics. **Micromachines**, v. 9, n. 8, p. 394, 2018.

SKAFTE-PEDERSEN, Peder et al. Multi-channel peristaltic pump for microfluidic applications featuring monolithic PDMS inlay. **Lab on a Chip**, v. 9, n. 20, p. 3003-3006, 2009.

SOUSA, Diogo Ramadas da Silva Costa. **Desenvolvimento de metodologias e dispositivos analíticos com detecção ótica para a indústria agroalimentar**. (Tese de Doutorado). 2016.

TOFAIL, Syed AM et al. Additive manufacturing: Scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. **Materials today**, v. 21, n. 1, p. 22-37, 2018.

VINAYAKUMAR, K. B. et al. Packaged peristaltic micropump for controlled drug delivery application. **Review of Scientific Instruments**, v. 88, n. 1, p. 015102, 2017.

WAHEED, Sidra et al. 3D printed microfluidic devices: enablers and barriers. **Lab on a Chip**, v. 16, n. 11, p. 1993-2013, 2016.

KLESPITZ, József; KOVÁCS, Levente. Peristaltic pumps—A review on working and control possibilities. In: **2014 IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI)**. IEEE, 2014. p. 191-194.